

Treball de Fi de Grau

## **Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**

### **Robot per al manteniment del casc de vaixells**

#### **MEMÒRIA**

**Autor:** Lluís Manresa  
**Director:** Emilio Angulo  
**Convocatòria:** 09/2016



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



## Memòria

<b>1. RESUM.</b>	<b>5</b>
<b>2. OBJECTE:</b>	<b>7</b>
<b>3. ABAST.</b>	<b>9</b>
3.1. Elements que s'han dissenyat i analitzat al llarg del projecte: .....	9
3.2. Elements que no s'han dissenyat ni analitzat en el treball: .....	10
<b>4. JUSTIFICACIÓ:</b>	<b>11</b>
4.1. Industrial.....	11
4.2. Motivació personal.....	12
<b>5. ESTAT DE L'ART.</b>	<b>15</b>
5.1. Descripció.....	15
5.2. Problemàtiques. ....	16
5.3. Manteniment.....	19
5.4. Equip per al manteniment. ....	21
5.5. Tecnologies robotitzades per al manteniment del casc. ....	26
<b>6. ESPECIFICACIONS BÀSIQUES.</b>	<b>29</b>
<b>7. DISSENY CONCEPTUAL.</b>	<b>33</b>
7.1. Anàlisi d'alternatives conceptuais.....	33
7.2. Descripció dels mecanismes de l'objecte.....	34
7.3. Descripció de tots els possibles moviments.....	38
7.4. Funcionament.....	41
7.5. Anàlisi que els moviments anteriors assoleixen els requeriments. ....	47
7.6. Limitacions de moviment.....	49
7.7. Ventall de posicions.....	54
7.8. Massa del robot.....	56
<b>8. DISSENY DETALLAT.</b>	<b>59</b>
8.1. Càlcul de forces per a cada peça.....	59
8.1.1. Braç telescòpic.....	61
8.1.2. Articulació del telescòpic.....	63
8.1.3. Braç superior segon segment.....	66
8.1.4. Articulació paral·lelogram.....	69
8.1.5. Barra inferior primer segment.....	71

8.1.6. Articulació fixa.....	74
8.2. Dimensionament del perfil en els braços del primer i segon segment.....	76
8.2.1. Diagrama d'esforços de la barra superior segon segment.....	77
8.2.2. Diagrama d'esforços barra inferior primer segment. ....	80
8.2.3. Càlcul de la secció adient. ....	83
8.3. Anàlisi estructural de les peces per elements finits. ....	92
8.3.1. Consideracions. ....	92
8.3.2. Anàlisi de tensions i deformacions en cada peça:.....	95
8.4. Especificacions per als actuadors.....	104
8.5. Dimensionament de les unions.....	108
8.6. Dimensionament cargols de l'articulació fixa. ....	114
8.7. Càlcul de la possible bolcada. ....	121
<b>9. IMPACTE AMBIENTAL. ....</b>	<b>123</b>
9.1. Reducció del núvol de pols d'abasiu.....	123
9.2. Reducció de la petjada de carboni.....	126
<b>10. PRESSUPOST:.....</b>	<b>127</b>
<b>11. PLANIFICACIÓ. ....</b>	<b>129</b>
<b>12. CONCLUSIONS. ....</b>	<b>131</b>
<b>13. AGRAÏMENTS. ....</b>	<b>133</b>
<b>14. BIBLIOGRAFIA. ....</b>	<b>135</b>
<b>15. ANNEXOS. ....</b>	<b>137</b>
15.1. Imatges de l'assemblatge final.....	137
15.2. Plànols. ....	140





## 1. Resum.

Aquest projecte es pot descriure com la introducció d'una tecnologia automatitzada per a realitzar el procés de manteniment en el casc d'un vaixell, tant el granallat com el pintat en dic sec. La justificació i objectius de la introducció d'aquesta tecnologia respecte l'actual manteniment amb mà d'obra humana (en la majoria de drassanes) són bàsicament dins del marc qualitatiu:

- La disminució del temps total de manteniment. Degut a la reducció dels períodes de parada en el procés i al ràpid canvi del procés de granallat al procés de pintat pel braç robòtic.
- El reciclatge i reutilització del abrasiu sobrant abanç que aquest arribi a entrar en contacte amb el sòl del dic sec; aquest fet s'aconseguirà amb el recollidor present en l'eina de granallat.
- La substitució de la mà d'obra humana per una tecnologia automatitzada degut a les dures condicions de treball per aquests tractaments en el dic sec.

Per tant, si s'aconsegueix que el procés es realitzi de forma més ràpida i amb menys quantitat de material utilitzat el procés serà més eficient. Un cop justifica la millora d'eficiència industrial del procés es resumirà el disseny utilitzat per al tractament.

Aquest disseny consisteix en un sistema d'elevació motoritzat, que amb la utilització d'una eina de granallat i una eina de pintat en l'extrem del mateix, serà capaç de tractar tots els punts del casc exterior del vaixell que estiguin en l'abast del braç robòtic. D'aquesta màquina elevadora es dissenyarà mecànicament tot el braç robòtic simplificant alguns mecanismes com els actuadors, el braç telescòpic final i la base motoritzada; d'aquests elements simplement es simularà les seves dimensions, massa i funcionament en els models CADs creats. Es calcularan les forces del braç amb una configuració determinada, els anàlisis d'elements finits per a cada element i els dimensionaments de les unions (tant unions amb reblons com amb cargols). També s'ha estudiat la possible bolcada de la màquina en la seva posició més extrema.

Per acabar, confirmar que la màquina complirà tots els requeriments definits en el treball de forma qualitativa i que a més a més reduirà l'impacte ambiental ocasionat per aquests tipus de tractaments en el dic sec: reduirà el núvol tòxic qu es crea en el tractament de granallat i disminuirà la petjada de carboni creada pels sistemes

d'elevació motoritzats presents en el dic sec.

## 2. Objecte:

Aquest projecte consistirà en el disseny d'un robot per al manteniment de les superfícies exteriors del casc de vaixells. És necessari detallar que el manteniment del casc d'un vaixell consisteix en dos processos bàsics que són: primer el tractament de granallat<sup>1</sup> i després el pintat. Aquest robot permetrà el tractament de la part exterior del casc que està tant per sota de la línia de flotació<sup>2</sup> com la que està per sobre. Aquest tractament haurà de ser per tant, de l'obra viva del casc com de l'obra morta, per aquesta raó serà imprescindible elevar el vaixell en el dic sec per així poder tractar l'obra viva del casc. Aquest fet és pel fet que l'obra viva és la superfície del casc que sempre està en contacte amb l'aigua, consegüentment l'àrea del casc que sempre està sotmesa a reaccions d'oxidació per part de l'aigua i la incrustació d'organismes marins.

Aquest objecte definit a grans trets consistirà en una plataforma elevadora articulada convencional, que en lloc de situar-hi una plataforma en l'extrem es col·locaran unes eines adients per al tractament de granallat com per al tractament de pintat. Per tant, es tindrà una eina per al granallat i una altra eina per al pintat, d'aquesta forma el robot podrà realitzar aquests dos processos per al manteniment total del casc del vaixell. Per canviar d'un tractament a l'altre serà tan senzill com canviar l'eina de l'extrem del braç elevador.

Per últim, remarcar que en el tractament de granallat es dissenyarà un sistema de reciclatge d'abradiu per a l'eina que permeti recollir l'abradiu abans que aquest caigui al sòl. D'aquesta forma a mesura que es va duent a terme el tractament de granallat, l'abradiu sobrant després de l'impacte d'aquest en front el casc del vaixell, podrà ser recollit, reciclat i reutilitzat per al mateix procés. Amb aquesta millora s'aconseguirà una reducció de la quantitat d'abradiu a utilitzar per a realitzar el tractament i per tant, una millora de l'eficiència del procés.

---

<sup>1</sup> **Granallar:** tractament que consisteix en propulsar a alta pressió un abradiu (com pot ser arena o partícules metàl·liques) en front d'una superfície metàl·lica com pot ser el casc d'un vaixell. Serveix per allisar i eliminar els materials contaminants de la superfície. També es sol anomenar sorreig.

<sup>2</sup> **Línia de flotació:** és la intersecció formada pel casc del vaixell amb la superfície de l'aigua quan el vaixell està amb la seva màxima càrrega admissible. Separa la part submergida (obra viva) amb la part que no ho està (obra morta). També es sol anomenar calat.





### 3. Abast.

Aquest apartat es dividirà en dos subapartats que seran: el que s'ha dissenyat i estudiat en el projecte i el que s'ha prescindit de dissenyar en el mateix.

#### 3.1. Elements que s'han dissenyat i analitzat al llarg del projecte:



Figura 1: Parma16D de l'empresa MATILSA

- 3.1.1. S'ha dissenyat tot el braç articulat de la màquina elevadora menys el braç telescòpic de l'extrem i la base motoritzada. En la Figura 1 es pot observar la plataforma elevadora Parma16D que té un braç articulat semblant al dissenyat.
- 3.1.2. S'ha dissenyat una eina per al tractament de granallat que substituirà la plataforma que s'observa en la Figura 1.
- 3.1.3. S'ha especificat quins seran els actuadors que s'adquiriran per a realitzar cadascun dels moviments requerits per al braç robòtic.
- 3.1.4. S'ha dimensionat les unions amb passadors.
- 3.1.5. S'ha dimensionat les unions que fixen l'articulació base amb la base motoritzada.

### **3.2. Elements que no s'han dissenyat ni analitzat en el treball:**

- 3.2.1. Eina de pintat. Aquesta eina per al tractament de pintat no s'ha dissenyat ni estudiat, ja que seria un mecanisme molt semblant a l'eina de granallat, que en comptes de tenir un sortidor per a l'execució de l'abrasiu en l'extrem s'hi situaria un polvoritzador de pintura.
- 3.2.2. Braç telescòpic. Per tant, per a realitzar l'assemblatge de tota la màquina simplement s'ha simulat aquest braç, més endavant es detallarà com s'ha realitzat la simulació del braç telescòpic.
- 3.2.3. Base motoritzada. S'ha prescindit de fer l'estudi i el disseny de tots els elements que conformen la base motoritzada, que són: el grup hidràulic, els estabilitzadors hidràulics, el motor diesel, etc.
- 3.2.4. Sistema de control automàtic. Pel que fa al sistema electrònic i els algorismes que hauria d'utilitzar el robot per a poder automatitzar tots els seus moviments no es dissenyaran ni s'estudiaran en aquest projecte.
- 3.2.5. La precisió del tractament. Aquesta dada, sobre quina tolerància tindrà el tractament, va molt relacionada amb l'apartat anterior del sistema de control automàtic. Per tant, si no s'ha dissenyat un sistema electrònic de control automàtic, no serà possible determinar la precisió del tractament i doncs, no s'estudiarà en aquest projecte.
- 3.2.6. Digitalització de la superfície del casc per a poder automatitzar el procés.
- 3.2.7. Equip de granallat i pintat.

## 4. Justificació:

### 4.1. Industrial.

La justificació industrial consisteix bàsicament a introduir una tecnologia totalment automatitzada i que no depengui de la mà d'obra humana en les operacions de manteniment per al casc en el dic sec. Com veurem més endavant i amb més precisió en l'apartat estat de l'art aquestes operacions de manteniment en el dic sec són dutes a terme per mà d'obra humana i per tant, tenen una sèrie de restriccions:

- El temps total de l'operació s'incrementa desmesuradament mentre més gran és la superfície a tractar. Això és degut al fet que la propulsió d'abasiu en front de la superfície guiada per un operari és una feina amb molts intervals de parada; cosa que provoca un allargament del procés. El robot seria capaç de reduir gran part d'aquests intervals de parada disminuint el temps total de granallat d'una forma notable. A part de reduir els períodes de parada en el procés de granallat, també aportaria una gran reducció de temps total del manteniment gràcies a la rapidesa de canvi entre el procés de granallat i el procés de pintat; seria tan senzill com canviar l'eina de l'extrem de la màquina. Com es podrà observar en l'estat de l'art aquests processos van sempre molt lligats en el temps, per tant, el canvi d'un procés a l'altre es necessita que sigui el més ràpid possible. Sempre que parlem de qualsevol operació industrial és indiscutiblement necessari tenir en compte el temps que tardarà a efectuar-se dita operació, ja que és una característica que va associada a l'eficiència del procés. D'aquesta forma mentre més petit sigui l'interval de temps necessari per a fer el procés més eficient serà el mateix.
- Quantitat de recursos a utilitzar. En la majoria de drassanes<sup>3</sup> avui en dia, les operacions de granallat del casc no acostumen a reutilitzar el material en el moment, és a dir, abans que aquest arribi a tocar el sòl del dic sec. En altres paraules, l'abasiu a pressió és projectat sobre la superfície i un cop ha allisat i netejat la superfície d'impureses cau al terra del dic sec no tornant-se a reutilitzar. Amb el material sobrant es recull del terra una vegada acabades les operacions de granallat i es porta a reciclar. El canvi que suposaria la

---

<sup>3</sup> **Drassana:** instal·lació on es construeixen, es reparen i es realitza el manteniment dels vaixells.

introducció d'aquesta tecnologia seria el fet de poder reutilitzar l'abasiu de forma gairebé momentània. La màquina a causa de la presència d'un recollidor en la part de sota de l'eina permetrà arreplegar el material sobrant projectat sobre la superfície. Aquest recollidor serà representat més endavant en l'apartat disseny detallat. Un cop replegat l'abasiu utilitzat, en la sortida del recollidor s'instal·larà una mànega succionadora que transportarà el material sobrant gràcies a una bomba de buit. L'abasiu restant es desplaçarà fins a un dipòsit de reciclatge de granalla, on es realitzarà el procés de separació de les partícules d'abasiu reutilitzables amb les impureses arrencades del casc. Per tant, part de la granalla es podrà reciclar en el mateix moment cosa que provocarà una disminució en la quantitat de recursos utilitzats, fent l'operació més eficient.

Amb una disminució dels recursos utilitzats i una reducció del temps de l'operació s'aconseguirà incrementar l'eficiència del procés. Com que la projecció de l'abasiu i de la pintura sobre la superfície del casc sempre serà amb una inclinació i una distància específica i constant per a tota l'àrea de treball, l'acabat serà òptim i homogeni per a tota la superfície. Consegüentment si s'aconsegueix un bon acabat per al procés de manteniment, que és el que es persegueix en tot moment, augmentarà l'eficàcia de l'operació de granallat.

Per concloure l'apartat, esmentar que el que es busca amb la introducció d'aquesta tecnologia és incrementar tant l'eficiència com l'eficàcia actual d'aquest procés de manteniment, arribant a trobar un equilibri òptim entre els dos i en conseqüència, crear un procés millorat de l'actual augmentant l'efectivitat d'aquest.

## **4.2. Motivació personal.**

La motivació inicial que em va portar a elegir aquest tipus de treball va ser el fet que m'atreu molt el món del disseny tècnic i càlcul de mecanismes, el dimensionament de les estructures i l'anàlisi de les peces per elements finits. Partint d'aquest sector doncs, vaig intentar decidir-me pel disseny d'una màquina que introduís una certa millora en un procés industrial actual. Un cop vaig descobrir com es realitzen la majoria dels processos del manteniment per al casc dels vaixells vaig centrar-me en dissenyar una tecnologia que pogués suplantar aquests processos de manteniment.

Primer cal puntualitzar que aquest manteniment per al casc dels vaixells es du a terme en el dic sec, això és degut a que cal elevar el vaixell per sobre de la superfície del mar per així poder tractar tant la superfície que està per sobre de la línia de flotació com la que està per sota. Aquest projecte consistirà en implantar una tecnologia automatitzada per a què en els processos de manteniment es millori:

- L'eficiència del procés. Com es comentarà posteriorment en l'apartat estat de l'art, la majoria dels processos de manteniment per al casc dels vaixells es realitzen mitjançant mà d'obra humana. Aquest fet, juntament amb el fet que la superfície a tractar en el casc d'un vaixell és exageradament gran provoca que, el temps total del manteniment del casc del vaixell en el dic sec sigui excessivament gran. Per tant, la tecnologia automatitzada permetrà realitzar el manteniment de forma més ràpida.
- Les condicions de treball dels operaris que duen a terme aquests processos. Com detallarem més endavant en l'apartat d'estat de l'art, les condicions de treball per als operaris són molt perilloses, ja que els materials que s'utilitzen per al tractament són molt tòxics. D'aquesta forma la introducció d'una màquina totalment automatitzada permetria la substitució d'aquesta operació tan perjudicial per a l'ésser humà, per una operació automatitzada per un robot industrial.

Aquestes són les dues raons bàsiques que han encaminat a què el projecte sigui un robot per a substituir la mà d'obra humana en les operacions de granallat en la superfície exterior del casc dels vaixells. En aquest treball es realitzarà el disseny mecànic d'aquesta tecnologia automatitzada.



## 5. Estat de l'art.

### 5.1. Descripció.

Per a poder entendre com els tractaments de granallat es duen a terme en l'actualitat, vagi decidir citar-me amb l'enginyer de l'empresa portuària MB92<sup>4</sup> Jaume Passola per a poder veure les instal·lacions del Port Vell de Barcelona i agafar informació. Per tant, la informació present en aquest apartat té com a referència tot el que vaig poder veure en el dic sec de l'empresa MB92 i tota la informació que va poder-me facilitar.

Avui en dia les operacions de sorreig del casc en el dic sec es duen a terme en la majoria de dics secs mitjançant la mà d'obra humana. Aquest procés de granallat consisteix a propulsar a grans pressions partícules metàl·liques o de sorra contra la superfície d'un vaixell. La raó d'aquesta operació és perquè és la primera part del manteniment del casc d'un vaixell. Amb aquest tractament s'aconsegueix doncs, allisar la superfície i netejar-la de: restes de pintura, fragments d'àrea oxidats e incrustacions d'organismes marins. Deixant la superfície metàl·lica del casc nua i llisa per a la posterior part del manteniment. Aquest tractament també pot realitzar-se mitjançant un doll d'aigua a pressions molt elevades que allisen i netegen la superfície del casc de la mateixa forma. Aquest últim tipus de tractament avui en dia cada cop està tenint més èxit perquè és molt net i no és perjudicial ni per als operaris ni per al medi ambient, a diferència del sorreig amb abrasiu.

El segon pas del manteniment és el pintat del casc. És indispensable en el dic sec donar diverses capes de pintura en l'obra viva del casc un cop acabat el granallat, atès que la pintura que se li aplica a la superfície evita la incrustació dels organismes marins al casc un cop el vaixell es torna a dipositar en la mar. A més a més aquesta pintura és antioxidant. Aquesta pintura s'anomena antiincrustant o *antifouling*. La pintura antiincrustant conté una toxina que enverina els organismes marins que s'apropen al casc evitant la seva incrustació. El tractament de pintat hi ha dues formes essencials de fer-lo: pintat manual amb brotxa o pinzell i pintat per polvorització de la pintura. El primer com és lògic és un tractament més llarg i

---

<sup>4</sup> MB92. *Empresa per al manteniment de iots en el Port Vell de Barcelona*. Veure en l'enllaç [<http://www.mb92.com/>]. Data de consulta [17/07/2016] <sup>[1]</sup>



costós però té la característica de deixar un acabat exterior impecable; el segon té la característica de ser un tractament més barat i ràpid deixant un acabat bastant acceptable. Per a ficar un exemple el pintat amb brotxa es sol dur a terme per a pintar el casc de iots de luxe que exigeixen un acabat superficial perfecte; mentre que el pintat per polvorització es sol fer per a pintar vaixells de grans dimensions com petroliers o portacontenidors, atès que la seva superfície de casc exterior per a pintar és molt elevada, per el que és necessari que el procés de pintat sigui ràpid evitant allargar el temps total de manteniment.

## 5.2. Problemàtiques.

L'operació de granallat té una sèrie de problemàtiques que provoquen que el tractament sigui llarg, dur per als operaris que el realitzen i tòxic tant per al medi ambient com per als operaris. Aquestes problemàtiques són:

- La formació de núvols de pols. L'execució de partícules abrasives a altes pressions contra la superfície metàl·lica del casc provoca la creació de grans núvols de pols. Aquesta pols formada per partícules abrasives és molt tòxica tant per la pell humana com per a la inhalació d'aquestes, cosa que els operaris és obligatori que portin un equip de protecció per a tot el cos i un sistema de subministrament d'oxigen extern amb bombones per a garantir la respiració d'aquests. El fet que el procés actual sigui llarg en el temps ho provoca en part aquests núvols de pols, atès que la creació d'aquests núvols redueixen molt la visibilitat dels treballadors. Per la qual cosa és indispensable efectuar períodes de parada i així, les partícules abrasives del núvol vagin caient al terra millorant-se la visibilitat del casc.
- La força de reacció del tractament. L'acte d'executar la granalla a pressió amb una mànega contra la superfície del casc també provoca la necessitat de fer uns períodes de parada per a fer relleus entre els treballadors. Això és pel fet que la força de reacció de l'abrasiu un cop impacta amb el casc és considerablement elevada perquè la pugui aguantar un sol operari durant tot el període de granallat, per tant, és imprescindible fer relleus entre els treballadors. Aquesta força depèn de la pressió de sortida del doll d'abrasiu i és d'uns aproximadament 10 kg per a una pressió de 10 bars.
- Soroll. L'impacte de l'abrasiu contra la superfície metàl·lica provoca un soroll molt estrident que obliga als treballadors a portar orel·leres.



Figura 2: Sorreig d'unes cadenes metàl·liques

Totes aquestes problemàtiques relacionades amb l'impacte de l'abradiu contra el casc provoquen que les feines siguin molt difícils i perilloses per als operaris. Encara que estiguin obligats a anar molt ben protegits les condicions de treball per aquests processos són extremadament dures. En la següent imatge es pot observar com és el núvol de pols que es forma en el granallat (veure Figura 2). Al ser unes cadenes el que s'està tractant i no una superfície plana com la del casc del vaixell l'abradiu traspasa les cadenes formant-se el núvol a l'altra banda de l'operari. En canvi és lògic pensar que si el treballador està tractant la superfície del casc, l'abradiu que impacta sobre la mateixa rebota contra l'operari creant el mateix núvol d'abradiu al voltant del treballador.

En l'anterior imatge (Figura 3) es podrà observar dos operaris pujats en una plataforma elevadora duent a terme el sorreig del casc. Com es pot apreciar en la imatge els operaris porten un uniforme de protecció per a tot el cos a més a més d'un subministrament d'oxigen. El subministrament d'oxigen es pot identificar amb el tub vermell que els hi arriba fins darrere del casc de protecció. En la fotografia es pot comprovar com els operaris estaven en un període de parada, ja que no s'identifica abradiu sortint per l'extrem de la mànega de sorreig.



Figura 3: Operaris en un període de parada en l'operació de granallat

Per altra banda, el pintat que és la part final del tractament també té en comú una de les problemàtiques esmentades anteriorment per al granallat, i és l'elevada toxicitat de la pintura *antifouling*. A l'igual que les partícules abrasives, la pintura és molt tòxica tant per la pell com pel sistema respiratori de l'ésser humà. Per aquesta raó és obligatori que els operaris portin un equip de protecció per a tot el cos més un sistema de respiració assistida amb oxigen. En la Figura 4 es pot observar com un operari realitza l'operació de pintat per polvorització. Es pot apreciar l'equip protector obligatori per al procés.

Aquests dos processos per al manteniment, és lògic pensar que si són d'elevada toxicitat per a l'ésser humà també seran perjudicials per al medi ambient. Pel que fa al granallat, el núvol d'abradiu metàl·lic que es forma és extremadament perillós si aquest arriba a ficar-se en contacte amb els voltants del dic sec on s'està produint, com per exemple amb el mar o la platja. D'altra banda amb el pintat per polvorització també es té el mateix problema, a causa de la gran quantitat de dissolvents que conté la pintura, és imprescindible que aquesta no entri en contacte amb l'aigua del mar.



Figura 4: Operació de pintat per polvorització

### 5.3. Manteniment.

- **Manteniment en cobert.** Aquest és el tipus de manteniment per a l'obra viva del casc que es realitza per exemple en el dic sec del Port Vell de Barcelona. Consisteix a construir primer una estructura metàl·lica que envolti la zona del casc a tractar per a després poder cobrir-la d'una lona que la deixi tancada hermèticament i així evitar que puguin sortir a l'exterior productes sobrants d'abrasiu o pintura. El fet que MB92 tingui que du a terme aquest tipus de manteniment en el Port Vell de Barcelona és degut al fet que li obliga el Ministeri de Medi Ambient. Convé ressaltar en aquest punt que en els voltants del Port Vell es troba un cúmul de zones d'oci, hotels i passejos per on circulen persones de forma habitual. Per tant, aquesta és la causa en la qual el Ministeri es basa per obligar a MB92 a fer aquest tipus de tractament. Com es pot apreciar en la Figura 5, la zona que està enquadrada en verd és l'estructura que es fabrica al voltant de la



superfície per a fer-la hermètica. En aquest cas l'estructura està envoltant la zona de darrere del vaixell (popa).

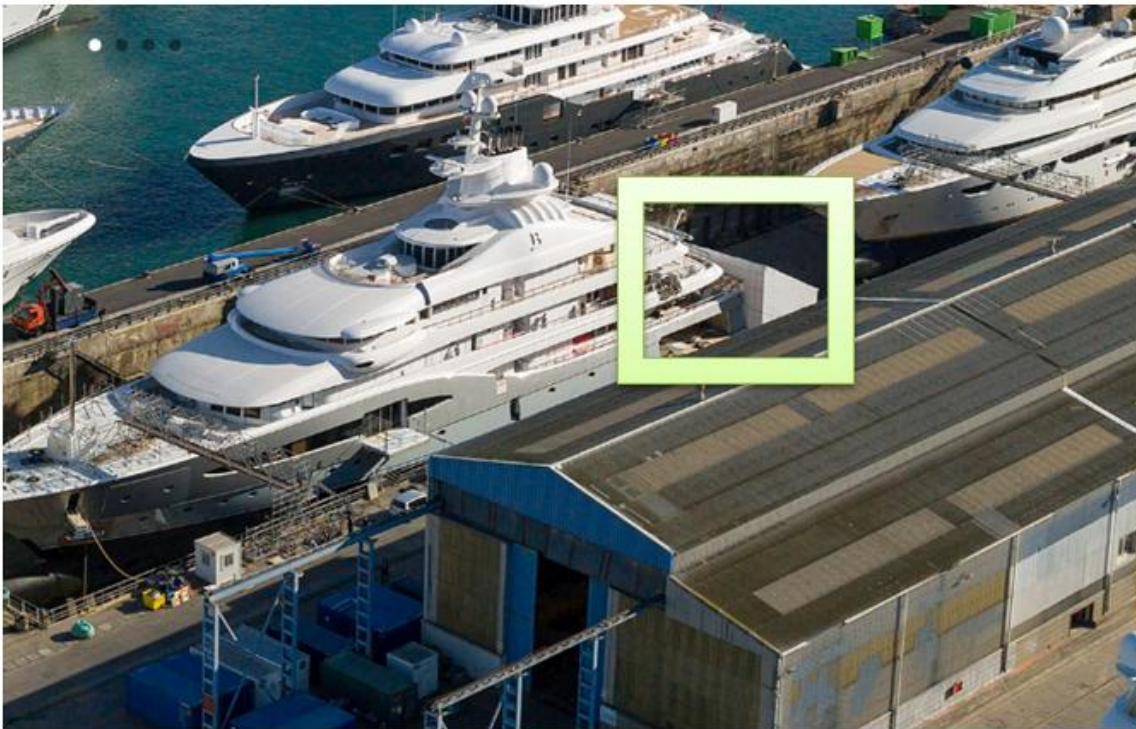


Figura 5: Dic sec del Port Vell de Barcelona (MB92)

- **Manteniment en obert.** Aquest és el manteniment més habitual que es produeix en els dics secs. Consisteix a realitzar les operacions de pintat i granallat a l'aire lliure, deixant que el material sobrant dels processos (abrasiu i pintura) caigui pel seu propi pes sobre el terra del dic sec per a ser posteriorment recollit i reciclat. El fet de no utilitzar una estructura hermètica de protecció per evitar que el material sobrant pugui escapar-se fora de les instal·lacions de la drassana obliga a què les ubicacions dels mateixos ports hagin de ser apartades de zones urbanes amb un trànsit de gent habitual. Per ficar un exemple, el dic sec del Port de Cádiz de l'empresa portuària Cernaual que realitza aquest tipus de manteniment, està ubicat en un polígon industrial apartat de les zones urbanes.

En aquests dos tractaments que conformen el manteniment de l'obra viva del casc, s'ha de tenir en compte que es persegueix que es realitzin de la forma més contínua possible. Aquesta problemàtica sorgeix arrel que el granallat deixa la superfície metàl·lica nua i exposada a l'oxidació per part del medi. Per aquesta raó és imprescindible que el temps d'exposició entre el granallat i el pintat no superi les 24 hores. D'aquesta forma, el fet de tractar grans superfícies com el casc d'un vaixell, la

millor estratègia és primer granallar àrees no massa excessives, per així posteriorment poder pintar sense cap problemàtica d'oxidació present en la superfície metàl·lica viva. Com que l'operació de granallat provoca una gran quantitat de pols en tot l'entorn, és necessari netejar el casc amb aire comprimit per facilitar la perfecta adhesió de la pintura.

Per acabar l'apartat, puntualitzar que en aquests dos processos és imprescindible saber triar el tipus de gra amb el qual es granallarà. Si es tria un tipus de gra petit, es tindrà l'inconvenient que el seu preu serà elevat però donarà l'avantatge de necessitar menys capes de pintura. Aquesta relació la provoca l'ínfima rugositat que deixa aquest gra, cosa que permet un gruix de pintura més petit i per



Figura 6: Abrasiu metàl·lic

tant, una disminució de la pintura utilitzada. Però si es tria una mida de gra més gran, com a avantatge es tindrà una disminució del preu del gra; tot i això, presentarà el inconvenient que donarà més rugositat i per tant implicarà més capes de pintura. Per salvaguardar aquesta problemàtica és necessari optimitzar la mida del gra. Ajustant la seva mida es podrà reduir la despesa econòmica en la compra de l'abrasiu i el consum de pintura. És fonamental la recerca d'aquest òptim de gra, ja que en tractar superfícies tan grans com les d'un vaixell la despesa econòmica per una tria defectuosa de les dimensions de l'abrasiu seria molt notable.

#### **5.4. Equip per al manteniment.**

En aquest apartat es detallaran tots els dispositius necessaris per a realitzar el procés de manteniment per al casc dels vaixells en l'actualitat. Per dur a terme les operacions de granallat en el dic sec, és necessari la utilització d'una sèrie d'elements que permeten l'execució de la granalla i la seva aspiració per a ser reciclada. Aquests elements, segons l'ordre d'actuació de cadascun dins del procés de granallat són:

- Dipòsit sorrejador per a l'abrasiu. Aquest element és el que conté l'abrasiu en el seu estat inicial. Per mitjà d'aire a pressió permet propulsar l'abrasiu a través d'una embocadura de sortida. La velocitat de sortida de partícules depèn bàsicament del diàmetre de l'embocadura i de la pressió de sortida d'aquesta.
- Compressor d'aire. Permet l'aportació d'aire a pressió en l'element anterior, per així poder propulsar l'abrasiu a través de la mànega connectada al dipòsit sorrejador.
- Mànega de propulsió. És l'element per on viatja l'abrasiu propulsat fins a l'embocadura situada en l'eina de granallat. En aquest punt l'abrasiu sortirà a l'exterior per a impactar contra la superfície i així poder tractar-la.
- Mànega d'aspiració. Un cop l'abrasiu impacta la superfície, aquest cau al sòl del dic sec pel seu propi pes. Un cop es troba dipositat en el sòl entra en joc la mànega d'aspiració, que per l'acció del buit en el seu interior succiona l'abrasiu sobrant del sòl transportant-lo pel seu interior fins al dipòsit de reciclatge.
- Bomba de buit. Aportarà el buit en la mànega d'aspiració per així poder transportar l'abrasiu utilitzat fins al seu reciclatge.
- Dipòsit de reciclatge. Aquest estarà unit a la mànega d'aspiració i anirà rebent l'abrasiu sobrant del tractament gràcies a l'efecte del buit. Un cop l'abrasiu entra dins del dipòsit es filtra, separant les partícules més grosses (abrasiu reutilitzable) de les partícules més petites (impureses i restes d'abrasiu inutilitzable).

D'aquesta manera es pot assegurar que es necessitarà operaris tant per a dur a terme la propulsió de l'abrasiu en front de la superfície com per a succionar l'abrasiu sobrant del sòl. Per dur a terme aquest sistema es adient que els elements comentats anteriorment estiguin a poca distància del punt d'incisió de l'abrasiu, ja que mentre més llarga sigui la mànega que transporta la granalla més pèrdues per fricció amb les parets de la mateixa es tindran i per tant, més pressió s'haurà d'utilitzar per a les dues bombes anteriors.

Com s'observa en la Figura 7, aquesta imatge mostra un tipus de sorrejador portàtil de l'empresa Couto Maquinaria S.L. Aquest equip de sorreig portàtil és de la marca RACOH i és el model RCH-200 amb 200 litres de capacitat en el seu dipòsit d'abradiu i una pressió de treball de 12 bars<sup>5</sup>. En la Figura 8 s'aprecia un dipòsit de reciclatge de l'empresa Couto Maquinaria S.L. Aquest dipòsit de reciclatge d'abradiu és el model RC-50-20 amb una capacitat de reciclatge d'abradiu metàl·lic de fins a 12 tones per hora<sup>6</sup>.



Figura 7: Sorrejadora RACOH



Figura 8: Dipòsit de reciclatge d'abradiu

---

<sup>5</sup> Couto Maquinaria S.L. Empresa d'equips de sorreig i pintat. *Equip de sorreig portàtil RACOH model RCH-200*. Especificacions presents en l'enllaç  
[<http://www.coutomaquinaria.com/doclib/documento/es/Ficha%20CHORREADORA%20RCH%200%20espaol.pdf>] Data de consulta [28/08/2016]. <sup>[2]</sup>

<sup>6</sup> Couto Maquinaria S.L. *Sistema de reciclatge d'abradiu RACOH model RC-50-20*. Especificacions presents en l'enllaç  
[<http://www.coutomaquinaria.com/doclib/documento/es/Ficha%20SISTEMA%20RECICLAJE%20DE%20ABRASIVO%20POR%20AIRWASH%20espaol.pdf>] Data de consulta [28/08/2016]. <sup>[3]</sup>



En la Figura 9 s'aprecia una mànega d'execució d'abrasiu de l'empresa anterior (marca RACOH) i que té una pressió de treball de 12 bars<sup>7</sup>.



Figura 9: Mànega d'execució d'abrasiu

Pel que fa a la bomba de buit, en la següent Figura 10 es pot observar una bomba de buit de l'empresa Griñó Rotamik S.A. amb diferents pressions de treball segons la necessitat del comprador<sup>8</sup>. Pel que fa al compressor d'aire comprimit que s'observa en la Figura 11 pertany a l'empresa AIRMAC. Aquest és un compressor de pistó model AIR 912/500, amb una pressió de treball de 15 bars<sup>9</sup>.

<sup>7</sup> Couto Maquinaria S.L. *Mànega de doll d'abrasiu RACOH model PREMIUM*. Especificacions disponibles en l'enllaç  
[<http://www.coutomaquinaria.com/doclib/documento/es/Ficha%20MANGUERA%20CHORRO%20es%20paol.pdf>] Data de consulta [28/08/2016]. <sup>[4]</sup>

<sup>8</sup> Griñó Rotamik S.A. Empresa distribuïdora de tecnologies de buit i pressió. *Grup de buit model DH-TH*. Enllaç present en [<http://www.grino-rotamik.es/productos/grupos-de-vacio/dh---th-22>] Data de consulta [28/08/2016]. <sup>[5]</sup>

<sup>9</sup> AIRMAC. Empresa de compressors i secadors d'aire comprimit. *Compressor de pistó AIR 912/500 TF/15*. Especificacions en l'enllaç  
[<http://www.airmaccompresores.com/es/products/%20compresores-aire-comprimido-compresores->



Figura 10: Bomba de buit



Figura 11: Compresor d'aire AIRMAC

de-piston-doble-etapa-airmac-compresores-piston/compresores-aire-comprimido-de-piston-con-transmission-por-correas-AIRMAC-AIR-912-500-TF-15] Data de consulta [28/08/2016].<sup>[6]</sup>

Pel que fa al tractament de pintat per polvorització, els dispositius necessaris per a realitzar-lo són semblants als comentats anteriorment per al tractament de granallat, l'única diferència es troba que en el pintat no s'acostuma a reciclar la pintura que no acaba incidint sobre la superfície del casc, ja que en caure al sòl es fa malbé i no es pot reutilitzar. Per tant, per a poder fer incidir la pintura sobre la superfície és necessari disposar dels següents elements:

1. Compressor d'aire. Necessari per a poder propulsar la pintura líquida fins al polvoritzador. Aquest compressor és semblant al de la Figura 11.
2. Mànega d'execució de la pintura. Serveix per a transportar la pintura des del seu dipòsit fins al polvoritzador per mitjà de l'ajuda del compressor. Aquesta mànega es pot observar en la Figura 4.
3. Polvoritzador. Es troba en un extrem de la mànega. Es pot observar en la Figura 4.
4. Dipòsit de pintura. És el lloc on es guarda tota la pintura líquida i està connectat amb la mànega d'execució.

## **5.5. Tecnologies robotitzades per al manteniment del casc.**

Avui en dia existeixen poques tecnologies automatitzades per a fer aquest tipus de processos, tot i això, en algunes drassanes s'està començant a introduir automatitzacions per als processos de granallat i pintat. Algunes d'aquestes tecnologies poden ser com la que s'observa en la imatge següent (Figura 12). Aquesta tecnologia<sup>10</sup> per al tractament de granallat amb aigua a pressió sobre el casc d'un vaixell, consisteix en un robot que se subjecta a la superfície exterior del casc mitjançant unes rodes imantades i amb les quals es pot desplaçar per sobre d'ella. Aquest robot per tant, s'aniria desplaçant per la superfície del casc d'una forma semblant a com ho fa un robot de piscina, al voltant de les parets de la piscina. Com s'observa en la imatge aquesta màquina té un braç robòtic davant seu que injecta aigua a pressions molt elevades per a netejar el casc. Aquest braç va basculant al voltant del robot, d'aquesta manera tracta la superfície del casc que es

---

<sup>10</sup> Empresa BRI OFFSHORE. *Robot de manteniment model M3 Hydroblasting*. Present en l'enllaç [<http://www.brioffshore.no/product/m3-hydroblasting>] Data de consulta [05/07/2016]. <sup>[7]</sup>

va trobant a mesura que avança. Aquesta tecnologia avui en dia té molt èxit amb el procés de granallat, ja que permet tractar la majoria de la superfície del vaixell amb un interval de temps curt i ho permet fer amb aigua a pressió cosa que evita l'impacte ambiental que ocasiona l'abrasiu metàl·lic. La problemàtica sorgeix que aquesta tecnologia no permet el pintat de la superfície, ja que el robot acabaria trepitjant la superfície pintada i perjudicant el acabat d'aquesta.



Figura 12: Robot granallador amb aigua a pressió



## 6. Especificacions bàsiques.

En aquest apartat s'especificarà quins són els requeriments que ha de tenir el robot elevador per a poder fer el manteniment les superfícies exteriors del casc definides en l'apartat abast del projecte. Aquestes especificacions seran qualitatives, és a dir, no es detallarà en cada requeriment quin valor quantitatiu haurà de tenir, ja que no ha sigut possible quantificar la majoria de requeriments a causa de la desconexió de les dades; per tant, les especificacions s'han centrat en el marc qualitatiu. Tot i això, algunes especificacions com per exemple la distància i l'angle d'incidència del doll d'abrasiu i la tolerància de les mateixes s'han pogut quantificar gràcies a la informació extreta de la visita a les instal·lacions d'MB92. A cada un d'aquests requeriments o variables se'ls hi assignarà un valor determinat per així poder determinar quins requeriments en el projecte són més importants i quins no. Les variables a tenir en compte seran doncs:

- La primera i més important és la **reducció de temps màxima**. Aquesta variable té un valor elevat perquè la disposició d'un vaixell en el dic sec té un cost extremadament alt per al propietari del vaixell; per tant, una reducció del temps d'estacionament en el dic sec comportaria un gran benefici per al propietari del vaixell. A més a més, si s'estudia des de la perspectiva de l'empresa portuària que fa el manteniment, també aconseguiria un increment del rendiment del dic sec, ja que la quantitat de vaixells que podria tractar seria major en un mateix interval de temps. D'aquesta manera es podria augmentar l'eficiència del dic sec i disminuint el temps total del manteniment.
- **Requeriments de moviment**. El robot ha de poder orientar-se en qualsevol direcció perpendicular a la superfície i poder assolir qualsevol punt de la superfície del casc, sempre i quan estigui en l'abast del braç robòtic. Aquesta és una de les variables més remarcables en el projecte; perquè mentre més altura i allargament horitzontal pugui aconseguir la màquina (més ventall de posicions) més gran seran els vaixells que podrà tractar. Aquesta variable tindrà un valor relativament gran, ja que permetrà al robot poder tractar una gran quantitat de vaixells.



- **El constant angle d'incidència del doll d'abasiu i la projecció de pintura<sup>11</sup>.** És imprescindible que l'angle d'incidència respecte a la normal de la superfície del tractament sempre sigui constant i d'uns 45° aproximadament. Aquest angle s'utilitza tant evitar els angles propers a 0° amb la normal del casc com els angles propers a 90°. Els angles propers a 0° provoquen que el doll de sortida un cop ha incidit sobre la superfície pugui impactar a gran pressió sobre l'operari o la màquina que l'està executant. Els angles propers a 90° provocarien que l'impacte de la granalla sobre la superfície no tingués la suficient energia per a arrancar totes les impureses presents. Per tant, l'angle que se sol utilitzar en aquest tractament és de 45°; per a què estigui prou allunyat dels angles 0° i 90° que creen les problemàtiques anteriors. Pel que fa al tractament de pintat, la pintura haurà de ser projectada de forma més o menys perpendicular sobre la superfície, mantenint constant aquest angle perquè l'adhesió de pintura sigui òptima.
- **La constant distància d'incidència del doll de granalla i de la projecció de pintura<sup>12</sup>.** És indispensable controlar la distància de sorreig a mesura que es va realitzant el tractament per a mantenir-la constant. La distància sorreig és bàsic mantenir-la sempre a una certa constant perquè l'arrencament d'impureses sigui eficaç i òptim. Aquesta distància depèn del diàmetre i de la pressió del doll incident. Mentre més gran sigui la pressió i el diàmetre més gran és la distància. Per ficar un exemple, en el dic sec del Port Vell de Barcelona (MB92) per a un diàmetre de sortida de 65 mm i una pressió de l'abasiu de 10 bars la distància estipulada per l'empresa que havien de deixar els operaris amb el casc és de 400 mm. S'utilitzarà doncs, aquesta distància per a especificar el projecte així doncs com el mateix diàmetre i pressió. Pel que fa a la distància del polvoritzador de pintura fins a la superfície, es desconeix aquesta dada; tot i això, aquesta distància haurà de ser sempre constant per a què l'adhesió de la pintura es realitzi de forma correcta i l'espessor de la capa de pintura sigui sempre constant.
- **Precisió del tractament.** Aquesta precisió dependrà bàsicament de si els valors de les dues especificacions anteriors es mantenen o no constants en el temps. D'aquesta forma mentre més precisió es vulgui menys han de

---

<sup>11</sup> Dades extretes de la visita a MB92. *Empresa per al manteniment de iots en el Port Vell de Barcelona*. Veure en l'enllaç [<http://www.mb92.com/>]. Data de consulta [17/07/2016]. <sup>[1]</sup>

<sup>12</sup> Dades extretes de la visita a MB92. *Empresa per al manteniment de iots en el Port Vell de Barcelona*. Veure en l'enllaç [<http://www.mb92.com/>]. Data de consulta [17/07/2016]. <sup>[1]</sup>

variar aquests valors respecte als estipulats. Per al tractament de granallat no es necessita una precisió molt elevada, és a dir, no és necessari ser molt escrupolós en la variabilitat d'aquestes dades. La tolerància doncs, per a la distància i l'angle d'incidència serà d'uns  $\pm 50$  mm i d'uns  $\pm 5^\circ$  respectivament<sup>13</sup>. Pel que fa a les toleràncies del pintat, es desconeix aquesta dada; tot i que, es pot assegurar que seran menors que les toleràncies del granallat, ja que es necessita més precisió. Aquest fet és a causa d'una variabilitat massa elevada de la distància i de l'angle d'incidència podria provocar una mala adhesió de la pintura i que la capa de pintura tingués espessors diferents al voltant del casc.

- **Disminució del pes del braç.** Aquesta variable pren gran importància per al disseny del braç degut a que és determinant en la problemàtica de flexió del braç i bolcada de la màquina. És imprescindible optimitzar la massa fins al mínim possible per evitar la flexió excessiva del braç, ja que afectaria greument en la precisió del tractament. D'altra banda pel tema de bolcada del vehicle, és necessari que el centre de gravetat es desplaci el menys possible per salvaguardar la sortida del mateix fora del rectangle configurat per als quatre estabilitzadors hidràulics presents al costat de cada roda.
- **Rigidesa del braç.** Un braç rígid és el que ens evitarà part de la flexió del braç en les seves posicions més extremes, ja que serà menys deformable. Aquesta rigidesa s'aconseguirà amb una correcta geometria del braç i de les seves seccions. L'especificació de rigidesa també prendrà un valor moderat, en comparació per exemple amb l'optimització del pes, la qual tindrà un valor més elevat.
- **Reducció de cost.** Pel que fa al cost del robot és un dels requeriments que tenen menys importància en aquest projecte. Per tant, es buscarà que es compleixin totes les especificacions anteriors primer i en segon lloc s'intentarà reduir la inversió inicial que suposaria la fabricació i posada a punt del robot, però sense haver que realitzar grans modificacions en les especificacions anteriors.

---

<sup>13</sup> Dades extretes de la visita a MB92. *Empresa per al manteniment de iots en el Port Vell de Barcelona*. Veure en l'enllaç [<http://www.mb92.com/>]. Data de consulta [17/07/2016]. <sup>[1]</sup>





## 7. Disseny conceptual.

### 7.1. Anàlisi d'alternatives conceptuals.

En aquest apartat s'estudiaran les alternatives que es va anar ideant per al disseny de l'objecte final que duria a terme els tractaments de manteniment. En primera instància, l'alternativa que es va triar per a començar a indagar sobre el mecanisme del projecte va ser un objecte similar al representat anteriorment en la Figura 12. Per tant, un mecanisme que s'enganxés a la superfície en tot moment i que a mesura que anés avançant pogués anar tractant la superfície per on passava. Amb aquest tipus d'objecte un dels problemes més evidents que s'obtenia era com s'aconseguia que sempre estigués adherit a la superfície del casc. Aquesta problemàtica es va intentar salvaguardar raonant els següents mecanismes:

1. Primer es va pensar que l'objecte tingués l'aparença d'un artròpode com per exemple una aranya, és a dir, que estigués format per diferents braços articulats amb una ventosa a l'extrem de cada un i que mitjançant un sistema de buit pogués enganxar-se a qualsevol superfície. Per tant, el moviment d'aquests braços seria similar al moviment dels braços d'una aranya, amb la puntualització que els braços que estiguessin en contacte amb la superfície s'enganyarien a la mateixa per mitjà de la succió de les ventoses. La problemàtica d'aquest model sorgeix en la seva complexitat de disseny i anàlisi estructural, ja que l'objecte estaria format per molts braços articulats. També suposaria una problemàtica important el fet de saber quins braços moure i quins mantenir enganxats a la superfície en cada moment per a realitzar una trajectòria determinada al voltant del casc. Totes aquestes problemàtiques van provocar que s'acabés ideant un altre tipus de mecanisme de subjecció que és l'anomenat en el punt 2.
2. En segon lloc es va raonar un mecanisme de subjecció idèntic al mostrat en la Figura 12. Aquest mecanisme consisteix en unes rodes fortament imantades que s'enganyen a la superfície metàl·lica i que amb la seva rotació permeten moure's al sistema pel damunt del casc. Aquest mecanisme a diferència de l'anterior és més senzill de dissenyar i és capaç d'utilitzar velocitats de treball més elevades que l'anterior, ja que el moviment en aquest cas només depèn de la rotació d'uniques rodes.

Tot i això, aquests raonaments no van ser definitius en el treball perquè els dos tenen una problemàtica important, que no són capaços de dur a terme els processos de pintat. Aquesta problemàtica és a causa d'estar sempre en contacte amb la superfície. Això provocaria que el robot acabés trepitjant zones del casc pintades fent malbé el seu acabat exterior. Com bé s'ha comentat en l'apartat estat de l'art, el procés de pintat va molt associat en el temps amb el procés de granallat; ja que el granallat deixa la superfície metàl·lica nua i exposada al medi. Això provoca que s'oxidi amb molta facilitat i rapidesa, per tant, és imprescindible que els dos processos siguin gairebé continus en el temps evitant així tindre problemes d'adhesió de la pintura per la presència d'oxidacions en la superfície. Aquest fet em va portar a triar un altre tipus de tecnologia per al manteniment, que se centrés bàsicament en poder dur a terme aquests dos processos de manteniment. Per tant, l'objecte final triat és un braç robòtic elevador perquè així no ha d'estar en contacte amb la superfície en tot moment, podent dur a terme el procés de pintat sense possibilitat de perjudicar l'acabat final. Aquest objecte serà descrit en els apartats següents.

## 7.2. Descripció dels mecanismes de l'objecte.

En aquest apartat es definirà com serà l'objecte i es fixarà quines seran les especificacions tècniques perquè es compleixin els requeriments del sistema anomenats anteriorment. En la següent imatge (Figura 13) es pot observar com quedarà el disseny final de l'asseblatge total amb un disseny CAD (programa de disseny SW 2015<sup>14</sup>). Cal matisar que el braç telescòpic de l'extrem i la base motoritzada simulen en el model CAD el funcionament d'un braç telescòpic i d'una base motoritzada que s'adquiriran a una empresa externa. Es necessari puntualitzar que a partir d'aquest moment es considerarà que el braç telescòpic i la base motoritzada s'adquiriran de l'elevador Parma16D de l'empresa MATILSA; tot i que es podrien adquirir d'una altra empresa. Aquesta consideració es realitza per així poder comparar les dimensions, pesos i moviments dels elements dissenyats amb els reals de la plataforma elevadora Parma 16D (veure Figura 1). Aquests dos elements que simularan els mecanismes reals de la Parma16D, compartiran una sèrie de característiques comunes:

---

<sup>14</sup> SW significa SolidWorks i és un programa informàtic de modelat 3D (CAD).

- Mateix pes. Pel que fa al braç telescòpic simular el mateix pes és imprescindible per a fer els càlculs estructurals i dimensionals adients de la resta del braç articulat. Per al telescòpic també és indispensable intentar simular com es desplaça el centre de gravetat (CG) a mesura que s'allarga o s'escurça el braç, per així poder aproximar de la millor manera la posició del CG en les posicions més extremes del braç robòtic. Pel que fa a la base motoritzada s'ha de simular el mateix pes que la real, perquè en l'hora de fer els càlculs sobre la possible bolcada del sistema en la seva posició més extrema, és una dada necessària per a calcular on caurà el CG de l'assemblatge final.
- Mateixes dimensions. Per una banda, el model CAD del braç telescòpic s'ha dissenyat amb les mateixes dimensions del braç telescòpic real (veure fitxa tècnica de la Parma16D en Annexos). Aquestes dimensions que s'han

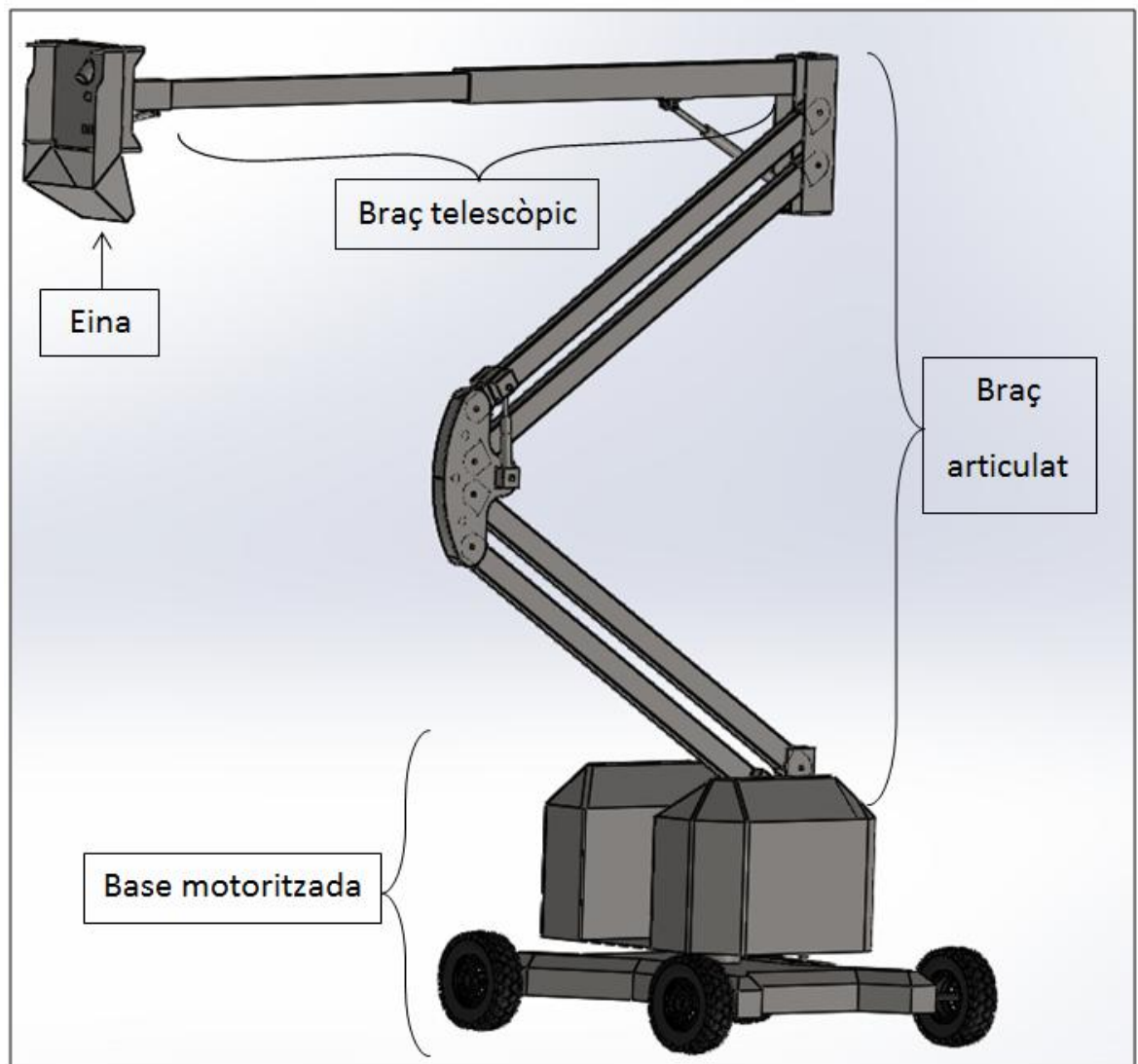


Figura 13: Assemblatge final

copiat de la màquina de MATILSA són: l'amplada i l'alçada de la secció del telescòpic i les distàncies entre extrems quan el braç està totalment allargat o totalment escurçat. Són especialment importants les dues últimes distàncies per les següents raons: poder aproximar on caurà el CG en el model CAD a mesura que s'allarga o s'escurça el telescòpic i poder determinar el ventall de posicions que podrà assolir l'eina situada en l'extrem del braç telescòpic. Per altra banda, s'ha realitzat un model CAD de la base motoritzada amb unes dimensions similars a les de la base Parma16D, per així veure en els càlculs de possible bolcada si el CG de l'assemblatge cau dins del rectangle confinat per les quatre rodes.

- Mateixos moviments. Pel que fa al braç telescòpic haurà de poder realitzar el moviment lineal d'allargament i escurçament entre les seves posicions extremes. Mentre que la base motoritzada necessita poder moure's pel pla del dic sec amb l'acció de quatre rodes direccionals i motrius, com també du a terme la rotació de l'eix giratori.

És necessari puntualitzar que per a dissenyar els models CAD tant de la base motoritzada com del telescòpic s'ha fet una simplificació creant-los únicament amb una carcassa per a què puguin simular uns mateixos: pesos, dimensions i moviments. En altres paraules, de tots els elements que hi ha en l'interior de cada mecanisme s'ha evitat dissenyar-los simulant el seu pes en la carcassa i repartit de forma homogènia per tota ella. Per una banda, els elements interiors simplificats de la base motoritzada són els anomenats anteriorment en l'apartat abast, per exemple: el grup hidràulic, el sistema de transmissió i direcció de les rodes, els estabilitzadors hidràulics, etc. Per l'altra banda, en el braç telescòpic s'ha simplificat el cilindre hidràulic que es troba en el seu interior, repartint la seva massa de forma homogènia per la superfície.

A part de la simulació en el model CAD del braç telescòpic i la base motoritzada es dissenyarà un nou braç articulat i l'eina del tractament de granallat. El braç articulat tindrà una certa semblança al braç articulat de la plataforma elevadora Parma16D, però sense compartir les mateixes dimensions ni masses. Això es deu al fet que la plataforma elevadora de MATILSA està fabricada per a poder sostenir fins a un màxim de 320 kg de massa en la cistella de l'extrem<sup>15</sup>, mentre que la funció del robot elevador serà la de granallar i pintar amb l'eina de l'extrem; per tant no serà necessari dimensionar el braç perquè aguantí tals quantitats de pes en l'extrem. Els

---

<sup>15</sup> MATILSA. Empresa de plataformes elevadores. *Plataforma elevadora de referència és la Parma 16D*. Veure la fitxa tècnica en l'enllaç [<http://www.matilsa.es/doc/parma16dest.pdf>]. Data de consulta [05/08/2016]. <sup>[8]</sup>

seus requeriments seran diferents, com per exemple aconseguir un ventall de posicions més ampli. En el braç articulat es distingiran les següents parts:

- Articulació base. És la primera articulació que es troba a mesura que s'avança des de sota fins a dalt. Aquesta articulació va unida a la base motoritzada mitjançant uns cargols de fixació. Com es veurà representat més endavant aquesta fixació incorpora dos cilindres hidràulics que permeten l'aixecament del primer segment del braç articulat.
- Primer segment. Consta de dos braços amb secció rectangular i de 4 m cada un. El braç inferior del segment és el que està unit als dos pistons que surten de l'articulació anterior.
- Articulació del paral·lelogram. És l'articulació que es troba a continuació i s'anomena així, ja que acaba de tancar el paral·lelogram que conforma l'articulació de la base i el primer segment. Consta de dos cilindres hidràulics que permeten l'aixecament del segon segment del braç articulat.
- Segon segment. És idèntic al primer segment. El braç superior va unit als dos pistons que surten de l'articulació anterior.
- Articulació del telescòpic. Aquesta uneix el segon segment amb el braç telescòpic. Consta d'un pistó que permet l'elevació del braç telescòpic. Aquesta articulació té la peculiaritat que sempre està situada sobre la mateixa vertical que l'articulació de la base. Aquesta característica s'aconsegueix regulant la velocitat dels cilindres hidràulics de les dues articulacions anteriors, per a què així l'angle d'obertura respecte a l'horitzontal del primer i segon segment sigui sempre el mateix.

Pel que fa a l'eina de granallat, es caracteritza perquè té un sortidor per on es propulsa l'abradiu i on recollidor per on és arreplegat i posteriorment reciclat. Aquesta eina podrà inclinar-se respecte l'horitzontal del pla normal a la direcció del braç telescòpic, per mitjà d'un pistó que uneix l'eina amb l'extrem del braç telescòpic. L'eina de pintat serà molt semblant a l'eina de granallat, canviant el sortidor de la granalla per un polvoritzador de pintura.

### 7.3. Descripció de tots els possibles moviments.

El conjunt assemblatge final és capaç de realitzar els següents moviments:

1. Moviment en el pla del dic sec. Aquest moviment serà garantit per les quatre rodes motrius i direccionals. Tant el sistema de direcció com el de transmissió serà accionat pel grup hidràulic. Com bé s'ha comentat en l'apartat objecte serà el motor de combustió interna dièsel el que transmetrà l'energia al grup hidràulic de la base motoritzada. En la següent Figura 14 es pot observar com l'actuador número 1 present en les rodes és el que possibilita aquest desplaçament.
2. Moviment rotatiu de la base motoritzada. Aquesta rotació serà accionada per un motor hidràulic rotatiu en l'eix giratori de la base. Aquest element és el que es veu per sobre de la base amb quatre rodes, connectada amb la mateixa per un eix cilíndric. L'actuador número 2 de la següent imatge fa referència al motor rotatiu de l'eix giratori.
3. Moviment vertical del braç articulat ( $\alpha$ ). Aquest moviment s'aconseguirà gràcies al parell de cilindres hidràulics lineals que es disposaran en l'articulació base i en l'articulació del paral·lelogram. Aquesta part del braç té unes peculiaritats especials que és necessari que siguin detallades:
  - 3.1. Els dos segments formen un paral·lelogram amb les articulacions dels seus extrems, per tant, aquestes unions sempre seran paral·leles entre elles. Aquest fet provoca que una articulació no giri respecte de l'anterior, sinó que es traslladi (paral·lelisme constant).
  - 3.2. L'altra peculiaritat afegida és que l'articulació del telescòpic sempre estigui sobre la mateixa vertical que l'articulació base. Això s'aconseguirà fent que la velocitat de gir de cada segment respecte a l'horitzontal sigui la mateixa, i doncs, mantenir sempre el mateix angle d'obertura ( $\alpha$ ). Aquesta tasca s'executarà donant una velocitat específica i diferent en cadascun dels parells de pistons hidràulics presents en l'articulació base i la del paral·lelogram. Aquestes velocitats seran les mateixes per a cada parell d'actuadors per així evitar la torsió del braç, però diferents entre el parell d'actuadors 3 i 4 (veure Figures 14 i 15). Aquesta diferència de velocitats la provocarà el fet que les distàncies de l'articulació als punts d'ancoratge de cada parell d'actuadors siguin diferents. Com es pot observar en la Figura 14 l'angle de l'horitzontal amb el primer segment és el mateix que el



de l'horitzontal amb el segon segment, anomenat  $\alpha$ . En la Figura 15 es pot apreciar amb més claredat els parells de cilindres hidràulics número 3 (articulació base) i els parells de pistons número 4 (articulació del paral·lelogram).

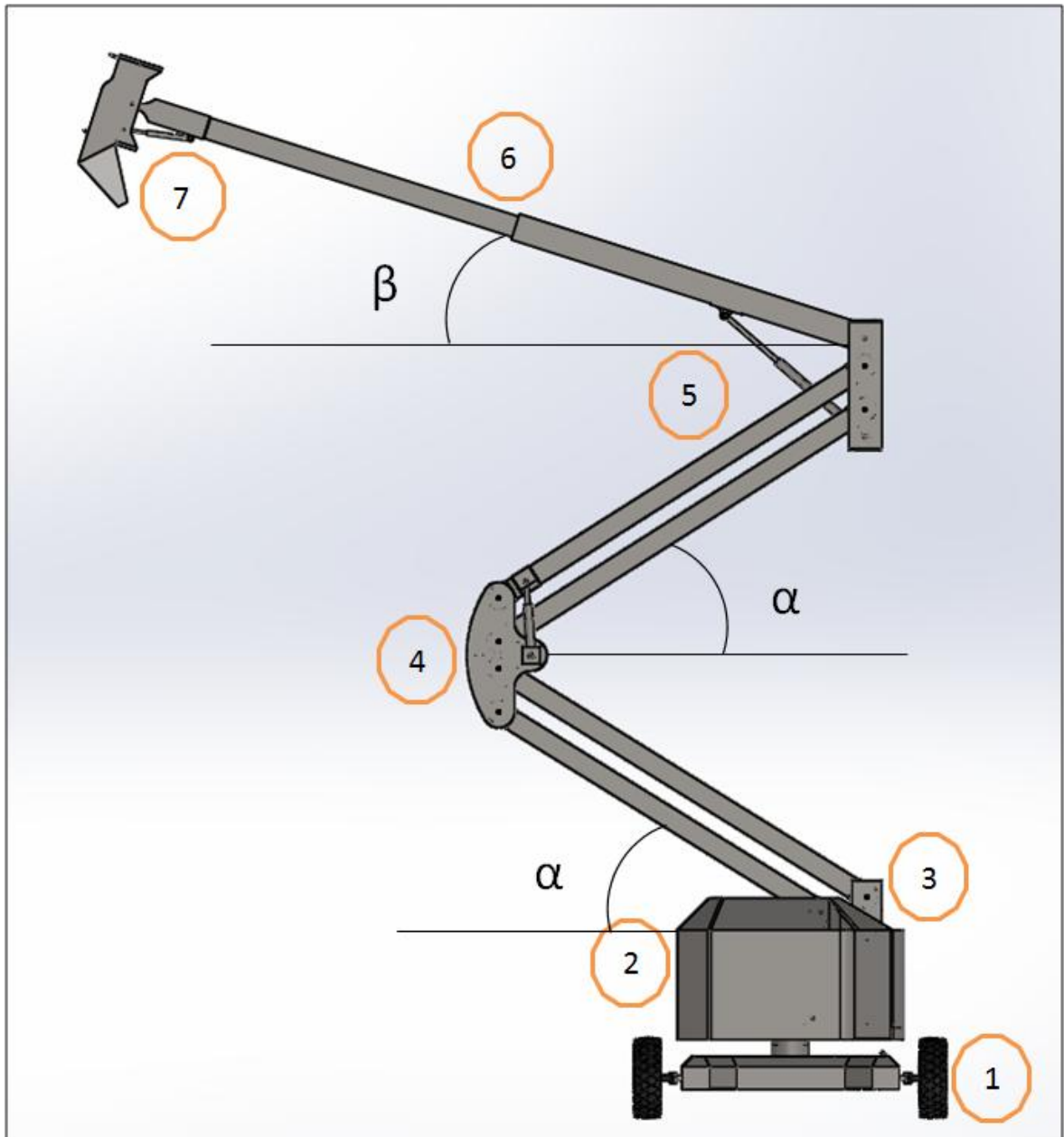


Figura 14: Angles d'inclinació i numeració dels actuadors presents

4. Moviment giratori del braç telescòpic ( $\beta$ ). Aquesta rotació la realitzarà l'actuador hidràulic lineal present en l'articulació del telescòpic. Aquest pistó és el número 5 en la Figura 14 anterior, i defineix l'angle entre la direcció del braç telescòpic i l'horitzontal, anomenat beta.



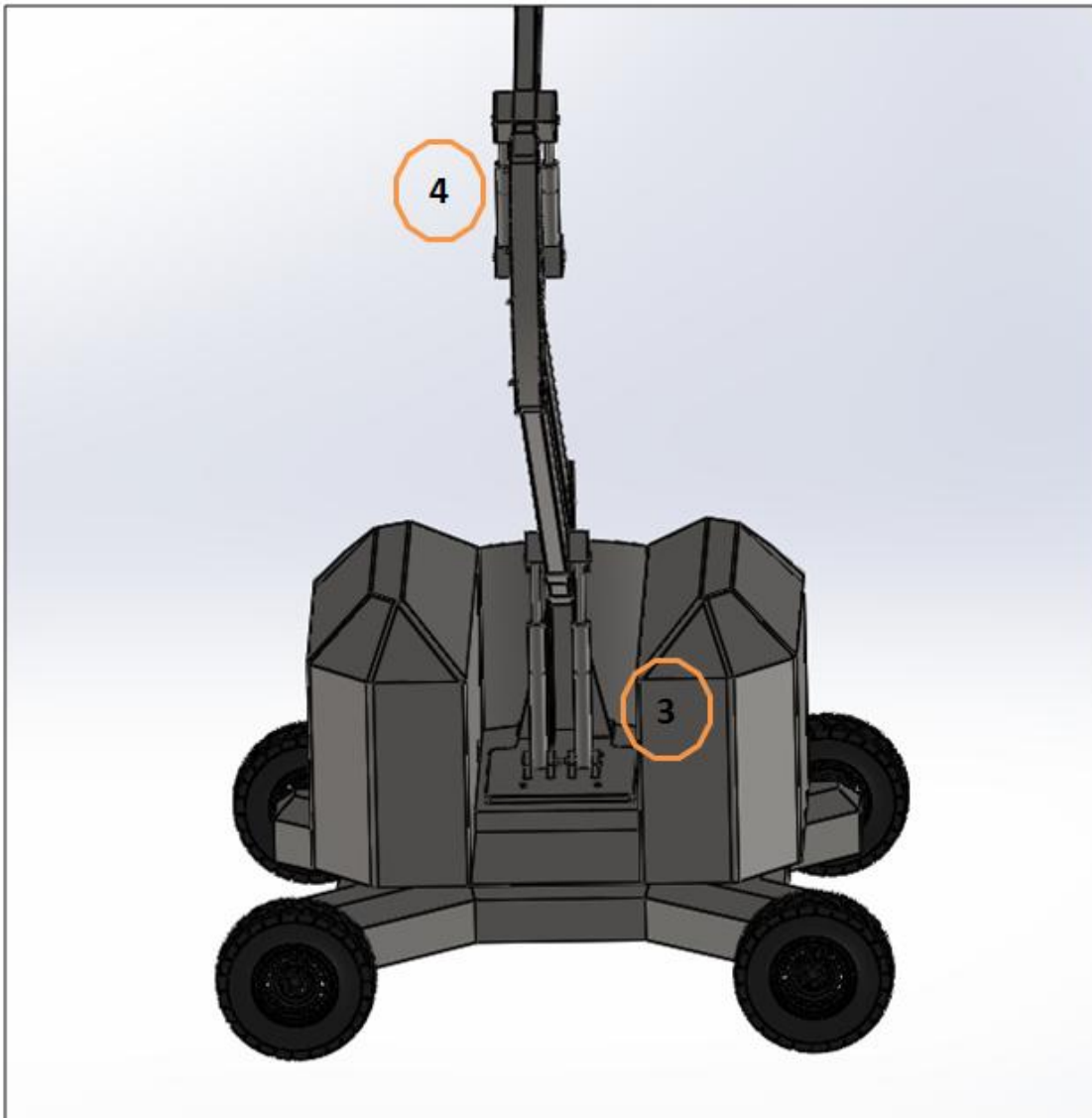
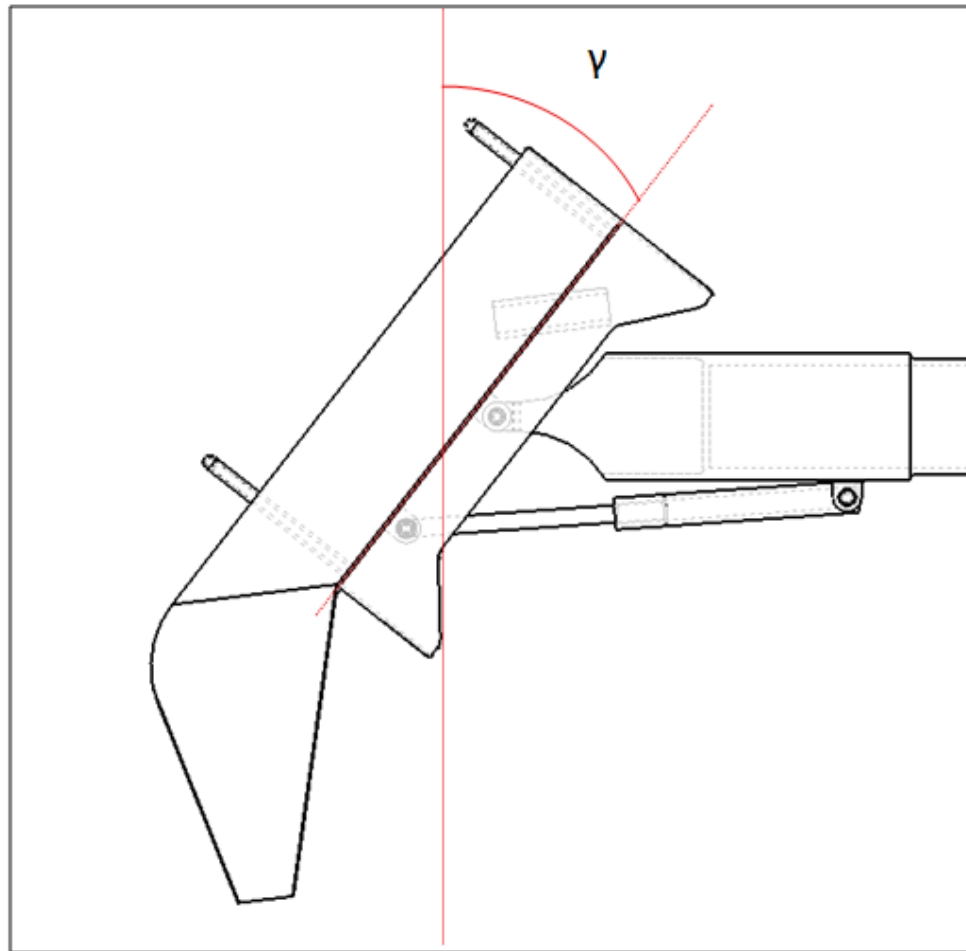


Figura 15: Vista lateral de la base

5. Moviment d'allargament o escurçament del braç telescòpic. Aquest desplaçament lineal és gràcies a un cilindre hidràulic que porta incorporat el mateix telescòpic en el seu interior. En la Figura 14 s'aprecia com el telescòpic està totalment allargat, gràcies a l'actuador número 6 en el seu interior.
6. Moviment rotatiu eina ( $\gamma$ ). Aquest gir de l'eina és respecte a l'horitzontal del pla normal a la direcció del braç i com es pot comprovar en la Figura 16 és anomenat gamma. Aquesta rotació està realitzada per un actuador lineal, el número 7 en la Figura 14.

Figura 16: Rotació  $\gamma$  de l'eina

És necessari especificar que tots els actuadors anteriorment detallats són de doble efecte, és a dir, permeten tant l'avanç com el retrocés del pistó.

#### 7.4. Funcionament.

En primer lloc és imprescindible distingir entre els dos tipus de sistemes de moviment que presentarà l'objecte robot:

- Sistema primari de moviment. El constituïran els moviments de la base motoritzada, és a dir, els moviments de les quatre rodes motrius i direccionals i la rotació de l'eix giratori respecte a la base amb rodes. A

més a més, en aquest sistema de moviment entrarà en joc l'actuació dels estabilitzadors hidràulics en cada extrem de la base.

- Sistema secundari de moviment. Estarà format doncs per la resta de moviments presents en el robot, és a dir, tots els moviments compatibles del braç robòtic; que són: la rotació  $\alpha$ , la rotació  $\beta$ , el desplaçament lineal del braç telescòpic i la rotació  $\gamma$ .

Aquesta diferenciació dels dos sistemes de moviment és deguda al fet que no serà possible realitzar moviments del sistema primaris en el mateix moment que moviments del secundari. Aquest impediment per al robot, és a causa que en el moment que s'està tractant la superfície i l'eina està a una distància molt petita del casc, qualsevol moviment de la base motoritzada podria provocar la col·lisió de l'eina amb el casc (veure eina de granallat en la Figura 17). Per tant, els únics moviments que seran permesos de forma simultània en el robot, són els d'un mateix sistema de moviment. Una altra diferència entre els sistemes és que l'execució de la granalla i de pintura només serà compatible amb els moviments del sistema secundari, per tant, el tractament es podrà du a terme de forma simultània només amb els moviments del braç robòtic.

Un cop feta aquesta diferenciació s'explicarà com serà el moviment del robot per a què l'eina pugui desplaçar-se a través de la superfície i posteriorment com s'automatitzarà el mateix. En primer lloc, el robot realitzarà el tractament fent passades verticals amb un continu sorreig de l'abrasiu o polvorització de pintura depenent del tractament. Per mitjà del sistema primari de moviment, primer orientarà el braç per tal que quedi perpendicular a la superfície del casc i després començarà a tractar el casc fent una passada vertical des de la màxima altura admissible per al robot, fins a la posició més baixa assolible. El robot utilitzarà els estabilitzadors hidràulics per a recolzar-se sobre el sòl del dic sec. Un cop feta la passada vertical, els estabilitzadors s'alçaran automàticament, el sistema primari avançarà una mica resseguint la direcció de la projecció vertical de la línia de flotació en el dic sec, els estabilitzadors tornaran a baixar automàticament i es realitzarà una altra passada vertical de tal forma que aquesta sigui contínua a l'anterior. Un cop definit el funcionament a grans trets, és important recalcar que la màquina elevadora sempre treballarà de forma transversal a la seva direcció d'avanç. Si l'avanç és en la direcció de la projecció vertical de la línia de calat sobre el dic sec, el braç robòtic haurà de treballar de forma transversal a la direcció d'avanç per poder incidir perpendicularment sobre la superfície a tractar.

Per a realitzar aquesta sèrie de moviments és necessari definir quin serà el sistema d'automatització que portarà incorporat el robot per a poder-ho du a terme. L'automatització del robot es dividirà en tres sectors principals, que són:

1. **Definició de la trajectòria a seguir per l'eina.** Per a definir aquesta trajectòria primer el que es realitzarà serà adquirir un model CAD de la superfície a tractar del casc. Es descarta aconseguir aquest model per mitjà d'una digitalització de la superfície, ja que és un sistema molt complex per a una superfície tan gran com el casc. Per tant, per salvaguardar la problemàtica es suposarà que s'aconsegueix aquest model CAD del fabricant del vaixell. En aquesta imatge es crearà una trajectòria de l'eina per a cada passada vertical que hagi de fer el braç robòtic per a tractar tota la superfície del vaixell. Cada trajectòria es durà a terme tenint en compte que la distància de l'eix de gir de

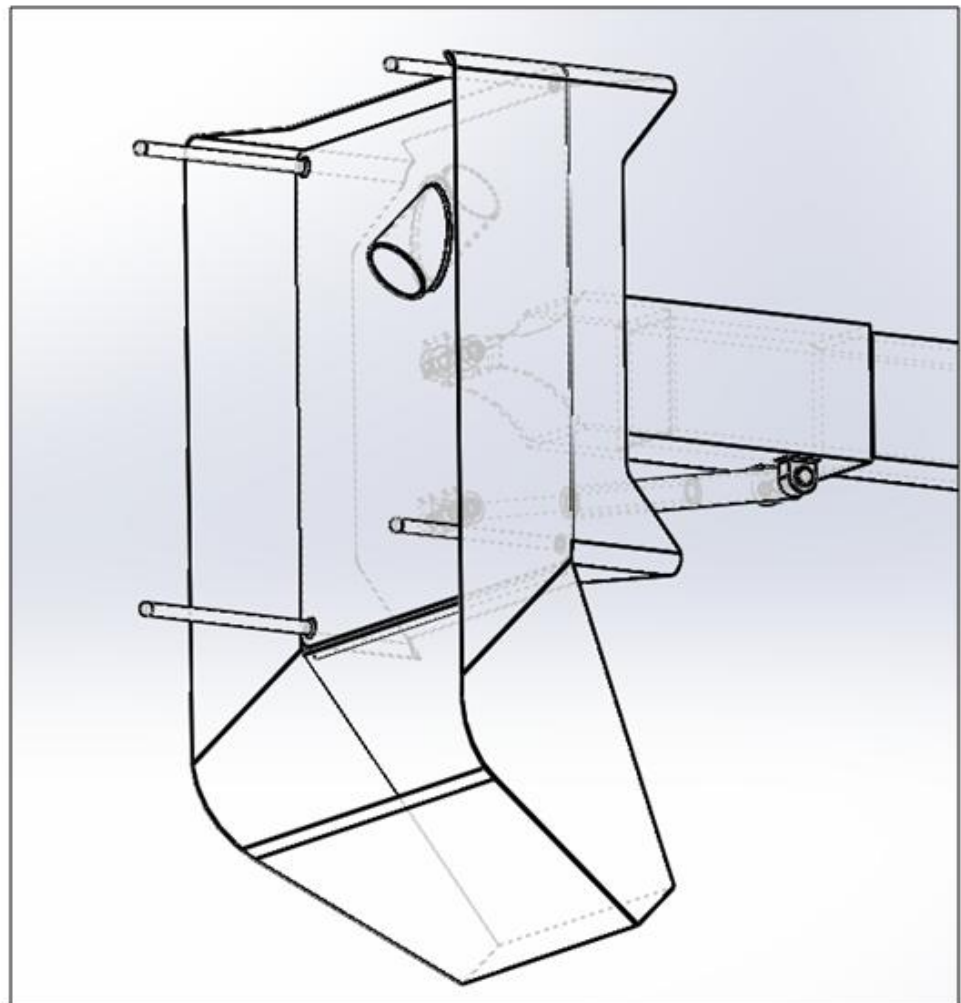


Figura 17: Eina de granallat amb palpadors en els extrems

l'eina a la superfície sempre sigui d'un determinat valor i constant. Per tant, cada punt de la trajectòria equidistarà un valor estipulat de la superfície del casc.

**2. Especificació dels moviments a realitzar per a resseguir cada trajectòria.**

Per a què l'eina pugui seguir cada trajectòria especificada en l'apartat anterior es calcularan cadascun dels moviments que el robot ha de realitzar. En aquesta seqüència de moviments és imprescindible saber que es tindrà en compte que el braç robòtic sempre sigui perpendicular al pla tangencial en el punt del casc a tractar. Per tant, en aquelles passades verticals on acabi variant la inclinació de la superfície respecte a la vertical del pla tangencial, s'enregistrarà en el robot una seqüència de moviments en el sistema primari perquè pugui orientar el braç robòtic de forma perpendicular a la superfície i així pugui continuar la passada vertical. En el moment que el robot es trobi en aquesta situació, parará el tractament i el braç robòtic s'allunyarà de la superfície, per a què així quan entri en joc la combinació de desplaçaments del sistema primari de moviment, l'eina no tingui la possibilitat de poder col·lidir amb la superfície en tractament. Per a realitzar aquesta combinació de moviments del sistema primari serà necessari pujar els estabilitzadors hidràulics i un cop acabada la combinació tornar-los a baixar. Després l'eina tornarà a apropar-se a la superfície per a continuar amb el tractament. Tota aquesta seqüència de moviments tant amb el sistema secundari (per seguir la trajectòria mentre granalla) com amb el primari (per corregir la perpendicularitat del braç robòtic amb la superfície del casc) estaran enregistrades en el programa informàtic que incorporarà el robot i seran diferents per a cada trajectòria a seguir.

**3. Reconeixement de les variacions d'inclinació respecte a l'horitzontal al pla tangencial en el punt a tractar.** Per al reconeixement d'aquestes variacions d'inclinació respecte a l'horitzontal es disposarà d'un sistema de sensors en els quatre extrems de l'eina que notificaran en tot moment si el pla de l'eina és paral·lel a la superfície d'incidència o no ho és. Gràcies a l'aportació d'aquestes dades al robot, per mitjà d'un programa informàtic, podrà corregir la inclinació de l'eina adaptant-se immediatament de forma paral·lela al pla tangencial en el punt de tractament, gràcies a la rotació de l'eina ( $\gamma$ ). A diferència de la seqüència de moviments que ha de realitzar el robot per les variacions d'inclinació respecte a la vertical descrit en l'apartat anterior, en aquest cas no serà necessari detenir el procés de tractament ni allunyar l'eina de la superfície per a corregir la inclinació de l'eina; per tant, es combinaran els moviments en un mateix interval de temps. Quan en la passada vertical els palpadors detectin una variació d'inclinació i quantifiquin la

dimensió d'aquesta, corregiran la inclinació de l'eina rotant-la (gir  $\gamma$ ) una magnitud proporcional i adient per a deixar el pla de l'eina paral·lela al casc. Aquest sistema de sensors consistirà bàsicament en uns palpadors de pressió. Aquests estaran posicionats en l'extrem de quatre tubs cilíndrics, presents en les quatre cantonades del pla rectangular de l'eina. Per tant, permetran quantificar la pressió exercida pel casc sobre l'eina en cada moment i comparar-la amb un valor estàndard i estipulat prèviament. En la Figura 17 es pot observar el sistema de palpadors de l'eina en el model CAD. Per exemple, a mesura que l'eina va fent la passada vertical de dalt a baix pot trobar-se en dues situacions:

- 3.1. Superfície que va sortint cap enfora del vaixell. En aquest cas a mesura que l'eina va baixant la pressió en els dos palpadors de sota de l'eina anirà augmentant. La magnitud d'aquest augment de pressió ens permetrà saber quant enfora sobresurt la superfície i per tant, quina magnitud de rotació  $\gamma$  ha de fer l'eina per a adaptar-s'hi. El sentit d'aquesta rotació serà

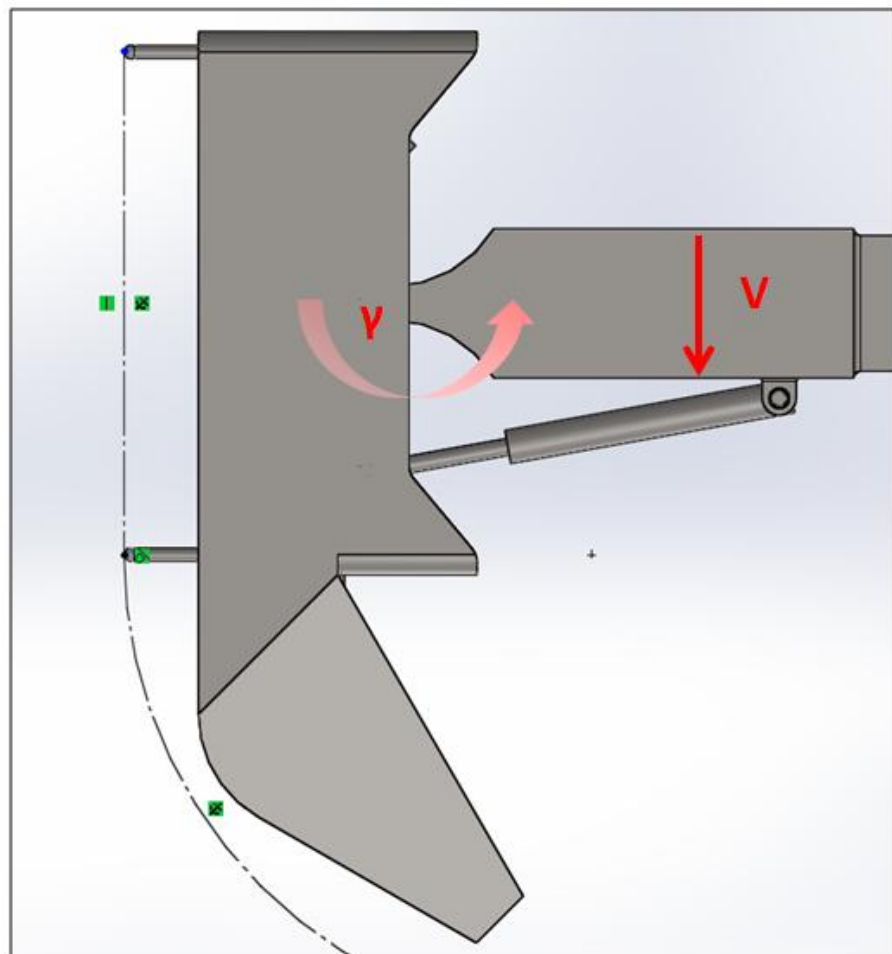


Figura 18: Línia discontinua indica la superfície sortint cap enfora

antihorari. En la Figura 18 es mostra en una línia discontinua la variació d'inclinació de la superfície cap enfora del vaixell, a més a més de la velocitat lineal de baixada del braç i la rotació antihorària de l'eina.

- 3.2. Superfície que entra cap endins del vaixell. Aquest cas serà el contrari del de dalt i per tant, els dos palpadors de sota rebran una disminució de pressió que activarà una determinada rotació horària perquè l'eina pugui adaptar-se a la superfície. Aquestes dues correccions per mitjà del sistema de palpadors de pressió seran possibles gràcies al fet que la velocitat lineal ( $v$ ) de l'operació de granallat (moviment vertical de l'eina per sobre de la trajectòria) serà molt petita, a raó d'uns  $0,5 \text{ m/s}$ <sup>16</sup>. En ser la velocitat de granallat tan petita, el marge de temps que té l'eina per a fer la correcció d'inclinació és més gran i per tant, l'adaptació a la inclinació del casc es podrà dur a terme de forma correcta i precisa. En la Figura 19, es

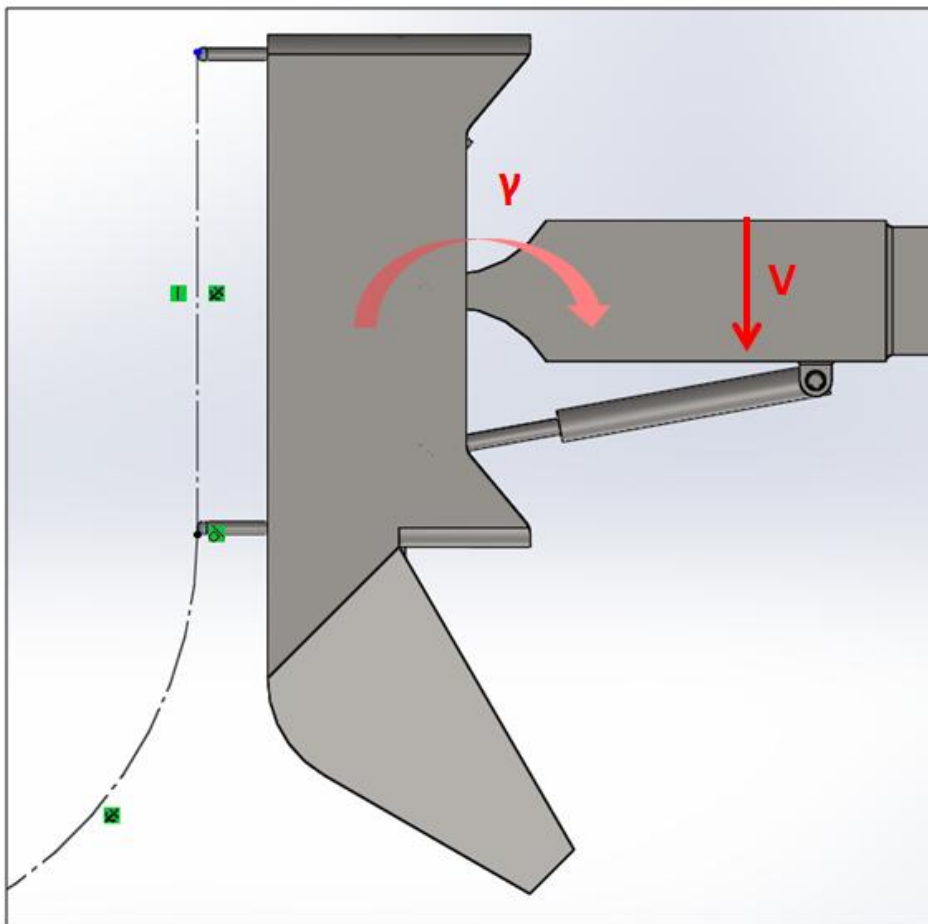


Figura 19: Línia discontinua indica la superfície entrant cap endins

<sup>16</sup> Dada extreta d'MB92. Empresa per al manteniment de iots en el Port Vell de Barcelona. Veure en l'enllaç [<http://www.mb92.com/>]. Data de consulta [17/07/2016].<sup>[1]</sup>



mostra el cas d'una superfície que entra cap endins del vaixell representada amb una línia discontinua i la rotació horària pertinent de l'eina.

Com s'ha observat, en l'eina s'ha decidit no ficar-li el segon grau de llibertat de la rotació respecte a la vertical. Aquest fet és el que provoca que al trobar canvis d'inclinació respecte a la vertical el robot hagi de combinar el sistema primari de moviment per a poder-se orientar de forma perpendicular al pla tangencial del punt a tractar. La combinació del sistema primari provoca un augment del temps total de granallat, ja que el tractament s'ha de detenir per a fer l'orientació. Tot i això, la majoria de passades d'un vaixell de grans dimensions, no tenen variacions d'inclinació respecte a la vertical al llarg de tota la passada; només en les zones com la proa o la popa es poden trobar aquestes variacions. Per tant, com aquestes zones són relativament petites respecte al total de superfície a granallar s'ha decidit prescindir d'aquest moviment per a l'eina; executant-lo de la manera que s'ha comentat anteriorment.

Amb aquest sistema s'aconseguirà garantir la precisió del procés de granallat, ja que es podrà mantenir el pla de l'eina paral·lel al pla tangencial de tractament en tot moment; fent que la distància i l'angle d'incidència sempre es mantinguin constants.

## **7.5. Anàlisi que els moviments anteriors assoleixen els requeriments.**

En aquest apartat s'analitzarà si els moviments presentats en l'apartat anterior són suficients per fer front a les especificacions del sistema. Es partirà de les especificacions del sistema que són les següents:

1. Requeriments de moviment. El robot ha de poder orientar-se en qualsevol direcció perpendicular a la superfície i poder assolir qualsevol punt de l'abast del robot elevador:
  - 1.1. Per assolir la primera especificació es conta amb dos moviments, que són: el moviment en el pla del dic sec facilitat per les quatre rodes direccionals i motrius (actuador número 1 de la Figura 14) i la rotació de l'eix giratori respecte la base rodant (actuador número 2). Per tant, gràcies a una

combinació d'aquests dos sempre es podrà aconseguir orientar el pla on se situa el braç robòtic per a què sigui perpendicular al pla tangencial de la superfície a tractar.

1.2. Per a complir el segon requeriment es disposarà de tres moviments: la rotació alfa (actuadors nombres 3 i 4 en la Figura 14), la rotació beta (actuador número 5) i l'allargament o escurçament del braç telescòpic (actuador número 6). Amb aquestes dues rotacions i el desplaçament lineal del telescòpic s'assolirà tot un cúmul de posicions dins del pla del braç robòtic per a l'eina situada en l'extrem del telescòpic. Aquest ventall de posicions serà detallat en el subapartat següent.

2. Pel que fa a les especificacions de mantenir constant l'angle d'incidència i la distància d'incidència, s'obtidran gràcies a l'estratègia de:

2.1. Mantenir en tot moment el paral·lelisme del pla de l'eina amb el pla tangencial del punt del casc que s'està tractant. Per tant, si es manté el paral·lelisme de l'eina amb el casc, com el sortidor de l'eina de granallat estarà dissenyat amb una inclinació de  $45^{\circ}$  respecte al pla de l'eina, s'assegurarà que l'angle d'incidència sigui de  $45^{\circ}$ . Pel que fa a l'eina de pintat com el polvoritzador estarà dissenyat en la direcció normal al pla de l'eina, la projecció de pintura sempre incidirà de forma perpendicular. Aquesta relació és conservarà constant gràcies al moviment rotatiu de l'eina respecte a l'horitzontal (actuador número 7 de la Figura 10 i 12). El fet que en l'eina només estigui permesa una rotació respecte a l'horitzontal, provoca que a mesura que es mou el braç robòtic, només sigui possible adaptar-se a les variacions d'inclinació respecte a l'horitzontal. Pel que fa a les variacions d'inclinació respecte a la vertical, les combinacions de moviments per salvar aquesta problemàtica, estan explicades en l'apartat anterior.

2.2. Mantenir sempre una mateixa distància perpendicular entre el pla de l'eina i el pla tangencial del punt a tractar en el casc. Aquesta constant serà salvaguardada pel moviment d'allargament o escurçament del braç telescòpic (actuador número 6 de la Figura 10), que permetrà apropar o allunyar l'eina de la superfície.

D'aquesta forma l'estratègia per complir els dos requisits de constant angle i distància d'incidència a mesura que es realitza la passada vertical, serà una combinació de mantenir el paral·lelisme entre el pla de l'eina i el pla tangencial del punt a tractar i la distància normal entre els dos plans. Per tant, per a complir aquests requisits és suficient combinar el moviment rotatiu de l'eina amb el

moviment lineal del braç telescòpic; en el cas de trobar variacions d'inclinació respecte a la vertical del pla tangencial a la superfície, s'hauran de combinar a més a més els moviments del sistema primari.

## 7.6. Limitacions de moviment.

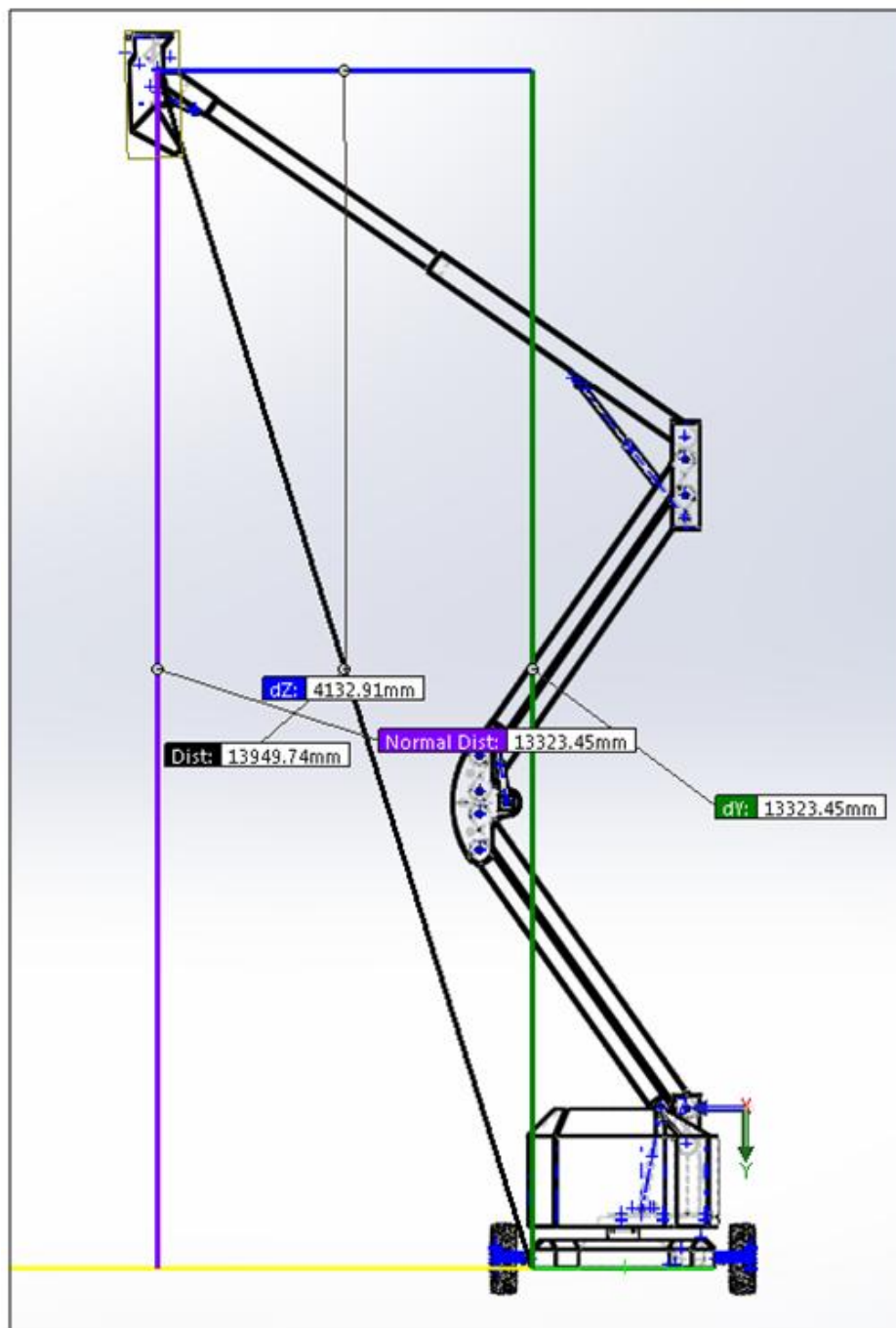


Figura 20: Altura quan està totalment desplegat

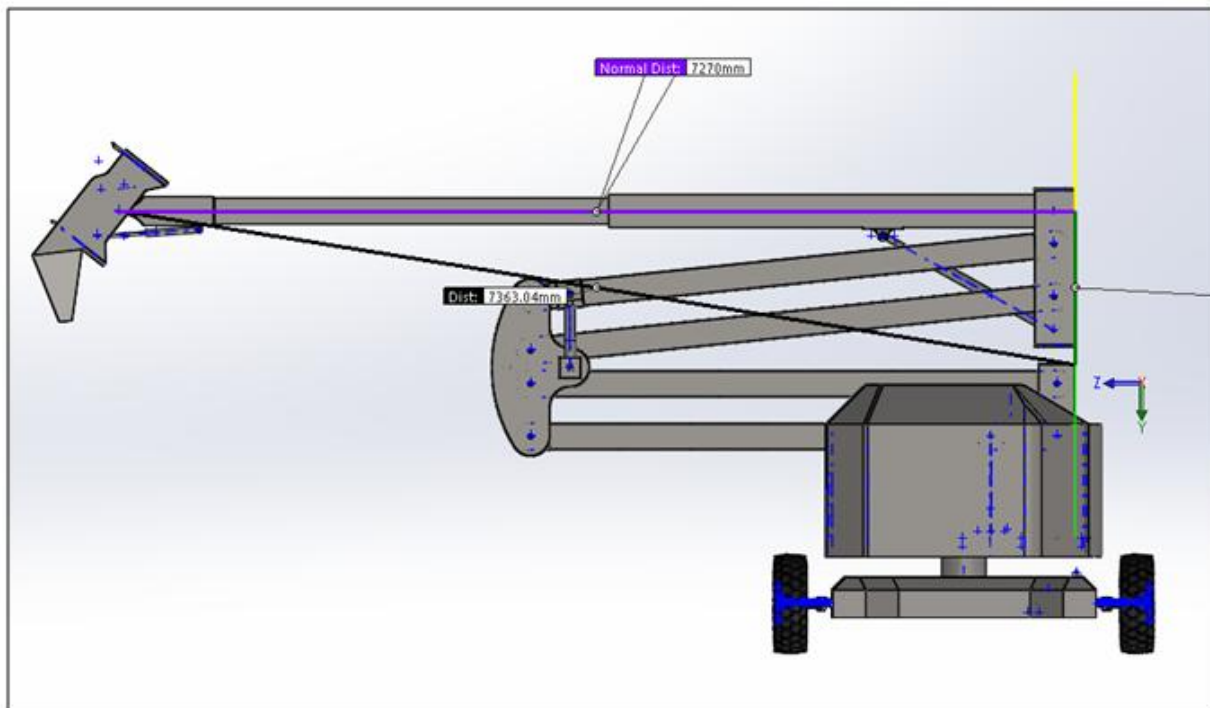


Figura 21: Llargada màxima quan està plegat

En les dues figures anteriors es pot observar el braç totalment desplegat en la primera d'elles i el braç totalment plegat en la segona. Pel que fa a les mesures que apareixen en les dues, les més importants són: de la Figura 20 l'altura total de l'eina quan la màquina està totalment desplegada que és de 13,3 m i de la Figura 21 la llargada màxima de 7,2 m quan el mecanisme està tot plegat menys el braç telescòpic que està desplegat. Per anomenar les diferents limitacions de cada moviment compatible amb la màquina, s'anirà resseguint els moviments presents en el subapartat anterior, que són:

1. Moviment en el pla del dic sec. Aquest moviment és delimitat per quatre rodes direccionals i motrius. Les quatre rodes direccionals permeten unes rotacions de  $[-45^{\circ}, +45^{\circ}]$  com bé es pot comprovar en la Figura 15. Amb aquesta amplitud de rotació i el fet que les quatre rodes siguin direccionals el robot adquirirà una gran agilitat i eficàcia per a poder orientar-se en una determinada posició fent el mínim recorregut possible. Aquestes limitacions de gir per a cada roda són les mateixes que s'imposen per la màquina Parma16D.

2. Rotació de l'eix giratori respecte la base amb quatre rodes. Per aquest moviment les limitacions són les mateixes que imposa la fitxa tècnica de la Parma16D; aquestes consten que l'eix giratori pot fer fins a un gir de  $360^\circ$  respecte a la base amb rodes<sup>17</sup>.

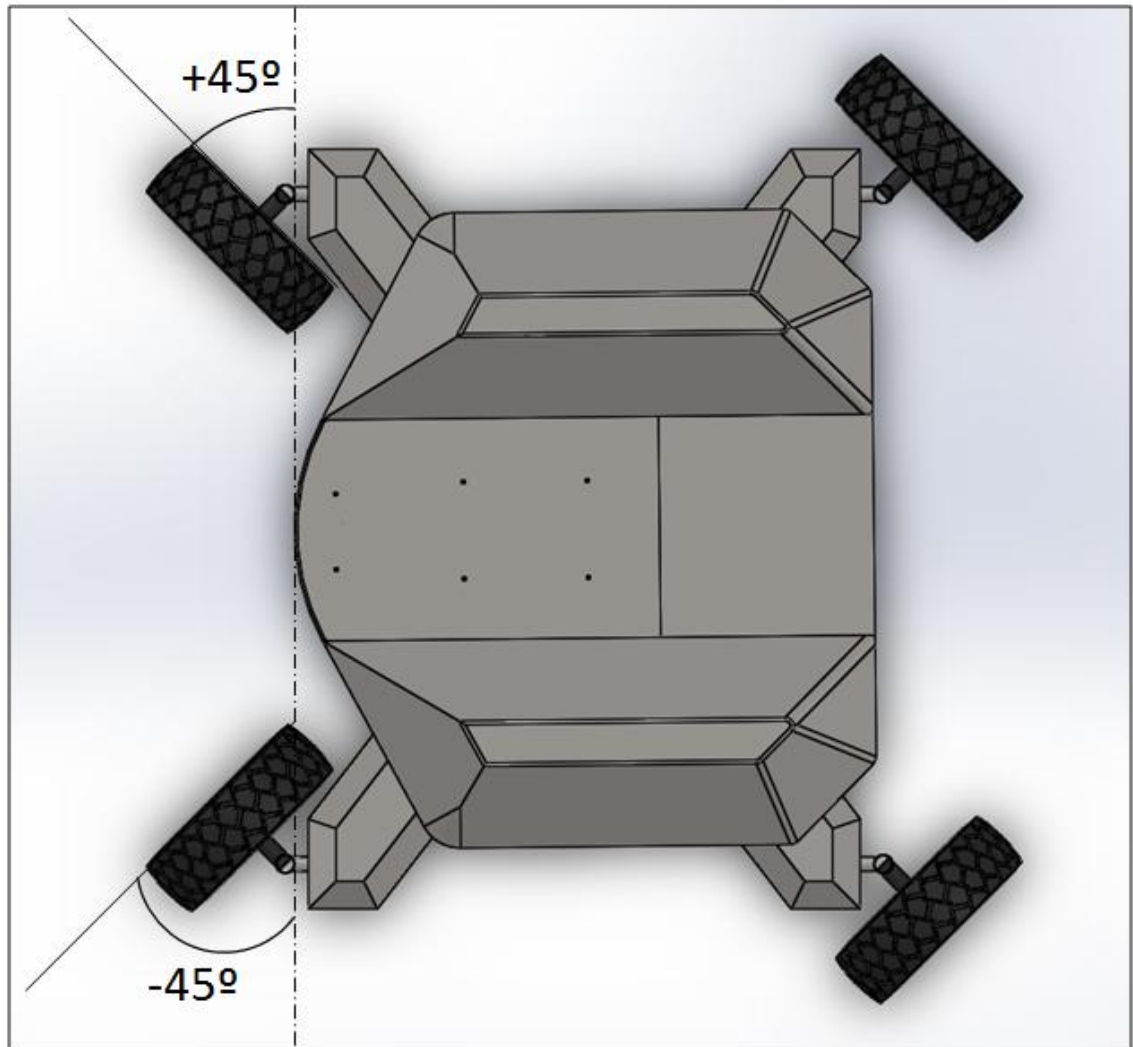


Figura 22: Angles màxims i mínims de direcció

<sup>17</sup> MATILSA. Empresa de plataformes elevadores. *Plataforma elevadora de referència és la Parma 16D*. Veure la fitxa tècnica en l'enllaç [<http://www.matilsa.es/doc/parma16dest.pdf>]. Data de consulta [05/08/2016].<sup>[8]</sup>

3. Moviment vertical del braç articulat. Aquest moviment, com bé s'ha especificat anteriorment es produirà de tal forma que sempre es mantingui el mateix angle d'obertura per als dos segments del paral·lelogram respecte a la seva horitzontal. Aquest fenomen es deu al fet que es pretén que el CG es vagi apropant a la vertical de la base motoritzada a mesura que el braç es va obrint i per tant, disminuir la possible bolcada. En la següent Figura 23 es pot observar com l'altura màxima del braç articulat quan està totalment desplegat és de 9,2 m d'altura. Respecte al que fa a

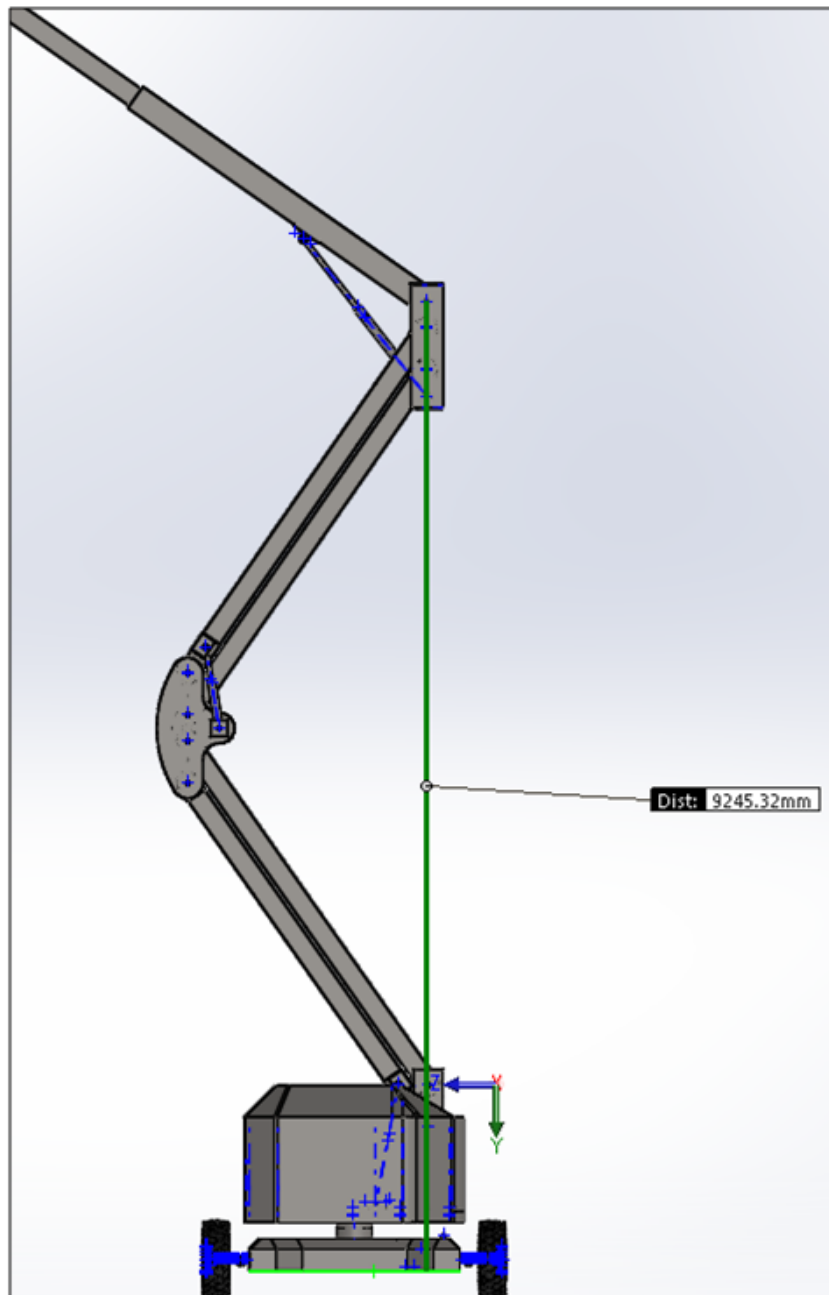


Figura 23: Altura del braç articulat quan està totalment desplegat

l'angle d'obertura de cadascun dels segments paral·lelograms respecte a l'horitzontal, anomenat alfa, les seves limitacions d'obertura són de  $[0^\circ, 55^\circ]$ . Aquests límits estan decidits de la següent forma: el límit de  $55^\circ$  és ja que si es supera l'angle, els braços de cadascun dels dos segments arribarien a col·lidir entre elles; mentre que el de  $0^\circ$  impossibilita l'execució d'angles negatius, ja que provocarien el superposició dels dos segments del braç articulat entre si. D'aquesta forma es pot deduir que amb l'obertura màxima del braç articulat, com es pot observar en la Figura 23, l'angle d'obertura és per als dos segments  $\alpha=55^\circ$ . Per altra banda, si s'observa la Figura 21, quan el braç està totalment plegat l'angle d'obertura del primer segment respecte a la vertical és de  $0^\circ$  mentre que l'angle del segon segment és d'uns aproximadament  $5^\circ$ . Aquesta diferència, ha estat imposada en l'assemblatge del model CAD per així evitar que quan el braç estigui totalment replegat l'articulació del telescòpic pugui col·lidir amb l'articulació base. Amb aquesta puntualització es treu la conclusió que en tot el model i les seves múltiples configuracions l'angle d'obertura respecte a l'horitzontal del primer segment del braç articulat és  $\alpha$ , mentre que l'angle del segon segment és igual a  $(\alpha+5^\circ)$ . Tot i això, en el moment de fer els càlculs es considerarà sempre que l'angle d'obertura és el mateix,  $\alpha$ .

4. Rotació del braç telescòpic respecte a l'horitzontal. Aquesta rotació, anomenada beta en la Figura 14, té uns límits de  $[0^\circ, +35^\circ]$ . La causa d'aquestes limitacions són:
  - Per una banda el límit superior és ja que la rotació de l'eina respecte a l'horitzontal té límit inferior en  $-35^\circ$  com es veurà posteriorment. Aquesta relació es deu al fet que amb el braç totalment desplegat es vol aconseguir que el pla de l'eina sigui vertical. Això és a causa que en les superfícies del casc properes a la línia de calat en els vaixells de grans dimensions, solen tindre un pla tangencial vertical, per tant, així aconseguiríem que el pla de l'eina sigui paral·lel a la superfície.
  - Mentre que el de  $0^\circ$  no deixa la possibilitat d'execució d'angles negatius, ja que l'eina podria impactar contra l'articulació del paral·lelogram i els punts d'ancoratge dels pistons amb l'articulació i el braç superior del segon segment.



5. Allargament i escurçament del braç telescòpic. Aquests límits de desplaçament lineal són els mateixos que s'imposen en les especificacions de la Parma16D<sup>18</sup>. Es definiran com les distàncies màximes i mínimes entre els extrems del braç telescòpic i seran [4 m, 7 m].
6. Rotació del pla de l'eina. Aquesta rotació és la inclinació compresa entre el pla normal a la direcció del braç telescòpic i el pla de l'eina, anomenada gamma en la Figura 16. Aquesta rotació la permet el cilindre hidràulic que hi ha en l'extrem del braç (número 7 en la Figura 14), i a causa de les seves especificacions i els seus punts d'ancoratge permet unes inclinacions de l'eina de  $[-35^{\circ}, +35^{\circ}]$  respecte al pla normal al braç. Aquests límits són els que definiran quines són les inclinacions (respecte a l'horitzontal del pla tangencial en el punt de tractament de la superfície) màximes i mínimes en el cas d'un vaixell que es possible tractar amb el robot.

## 7.7. Ventall de posicions.

En aquest apartat s'analitzarà el ventall de possibilitats de posició de l'eina en l'assemblatge final. Les dimensions per fer el ventall han set extretes de les limitacions anteriors per a fer els moviments compatibles del braç robòtic. En la següent imatge es pot observar el ventall de posicions per a l'eina. Aquest ventall són totes les posicions que hi ha presents dins de l'àrea tancada per les quatre línies discontinues. És imprescindible especificar que s'ha calculat mitjançant les dues posicions extremes de l'assemblatge mostrades en les Figures 20 i 21. Consegüentment l'àrea compresa, són totes les posicions que queden entre les dues configuracions, combinant a més a més les múltiples distàncies del braç telescòpic. Tot seguit, aquesta màquina també té la característica de poder girar els  $360^{\circ}$  al voltant de l'eix giratori en la direcció marcada en vermell a la imatge. Per tant, el ventall total serà aquesta superfície revolucionada  $360^{\circ}$  al voltant de la direcció de l'eix de la base.

---

<sup>18</sup> MATILSA. Empresa de plataformes elevadores. *Plataforma elevadora de referència és la Parma 16D*. Veure la fitxa tècnica en l'enllaç [<http://www.matilsa.es/doc/parma16dest.pdf>]. Data de consulta [05/08/2016]. <sup>[8]</sup>

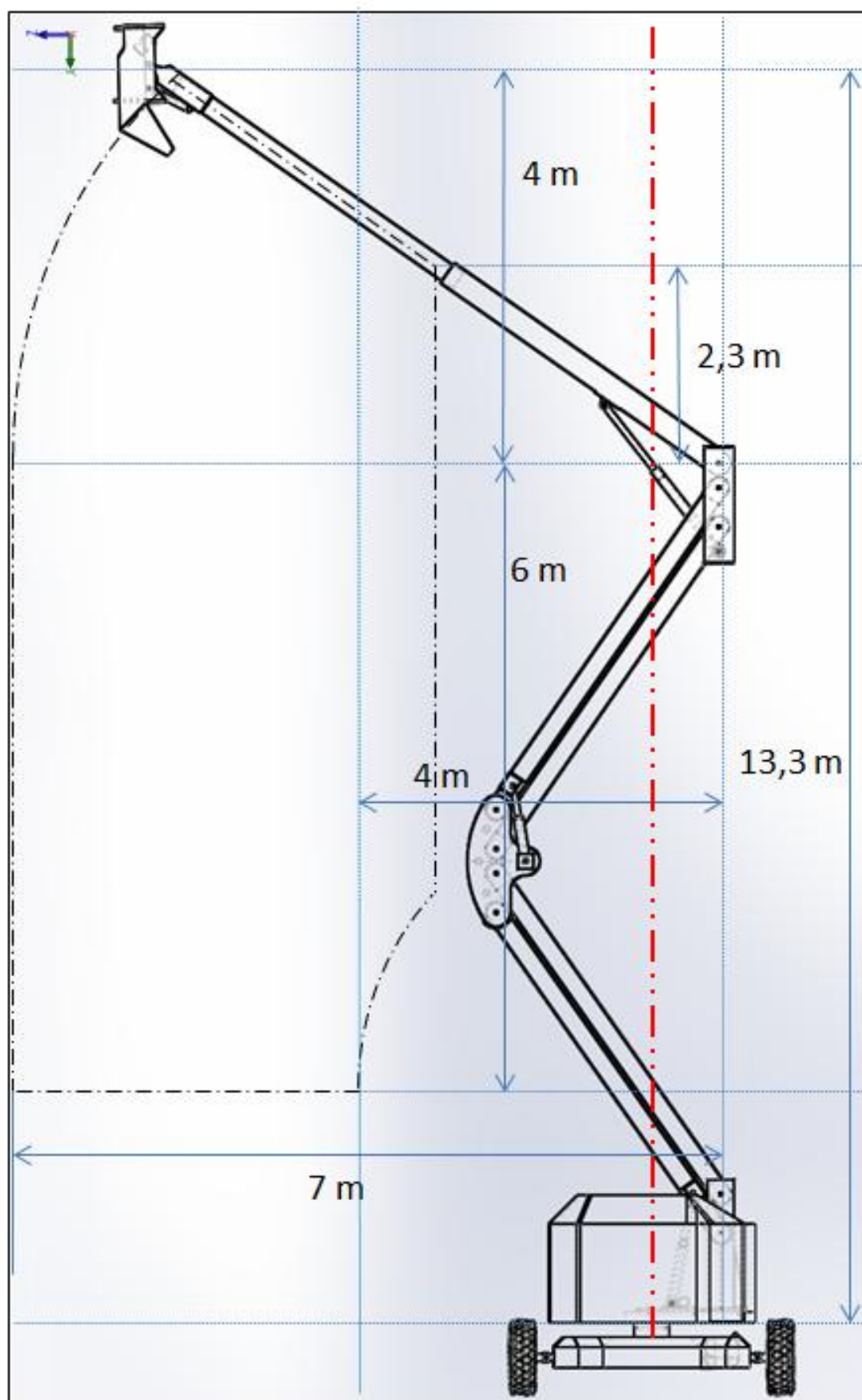


Figura 24: Ventall de posicions possibles per a l'eina

## 7.8. Massa del robot.

Arribat a aquest punt s'especificaran quins seran les masses del braç robòtic i de la base motoritzada en el model CAD, que són els següents:

- Braç robòtic. El braç robòtic dissenyat en el model CAD té una massa de 1.600 kg, mentre que el braç elevador de la màquina Parma16D té una massa de 2.400 kg<sup>19</sup>. Aquesta diferència entre masses té una explicació que es basa en els següents fets:
  - El robot no necessita suportar tanta càrrega en l'extrem com la màquina de MATILSA, que és capaç de sostenir una càrrega vertical en l'extrem de fins a 320 kg. El robot ha de suportar en l'extrem una càrrega d'uns 70 kg aproximadament (pes de l'eina), per tant no necessita un dimensionament tan elevat en la resta del braç com la plataforma elevadora Parma16D.
  - Conseqüentment, es pot afegir que la disminució del pes propi del model CAD provoca una reducció en la flexió total del braç. Per tant, com bé s'ha especificat en els requeriments del sistema és important disminuir el pes propi del braç per així disminuir la flexió d'aquest, ja que podria ser font d'error en els càlculs de la trajectòria a seguir per l'eina a mesura que es mou per la superfície.
  - Una disminució de la massa en el braç provoca una disminució de la probabilitat de bolcada quan la màquina està en la seva posició més extrema. Per tant, serà important a tenir en compte en el moment de fer els càlculs de bolcada.
- Base motoritzada. La base motoritzada del model CAD té una massa de 3.000 kg totals mentre que la massa de la base en la màquina Parma16D és de 5.500 kg<sup>20</sup>. Amb aquesta disminució de la massa del model CAD respecte a la base motoritzada de la màquina de MATILSA es vol aconseguir sobredimensionar el robot pels càlculs de la possible bolcada en les seves posicions més extremes. És a dir, si amb un pes menor de la

---

<sup>19</sup> Dada extreta de l'empresa MATILSA. [8]

<sup>20</sup> Dada extreta de l'empresa MATILSA. [8]

base motoritzada el CG cau dins del rectangle confinat per els quatre estabilitzadors hidràulics, amb un augment del pes de la mateixa base l'únic que s'aconseguirà és que el CG s'apropi encara més a l'eix vertical de gir de la base motoritzada.



## 8. Disseny detallat.

### 8.1. Càlcul de forces per a cada peça.

En aquest punt s'analitzaran les forces presents en cada element del braç robòtic per a què posteriorment es puguin fer:

- Els dimensionaments de les seccions del braç.
- Les anàlisis estructurals de tensions i deformacions per mitjà dels elements finits.
- Dimensionament dels passadors presents en les unions.
- L'elecció dels tipus d'actuadors necessaris segons les forces de treball que se'ls hi sotmet.
- Els dimensionament dels cargols que fixen l'articulació de la base.

Respecte al primer element del braç que és l'eina, no s'han analitzat les forces presents en el sòlid rígid, ja que seran insignificants en relació a les altres forces presents en el braç. L'element de l'eina només rep tres forces: la força dels palpadors de pressió, la reacció de la granalla en l'embocadura de sortida (d'uns 10 kg<sup>21</sup> en la direcció del sortidor) i la força de l'actuador que controla la seva rotació  $\gamma$ . El mòdul de les tres és tan baix relativament a les forces que aniran apareixent en els altres elements del braç robòtic, que s'ha decidit no tenir-les en compte en tots els següents estudis de l'apartat disseny detallat.

És important saber que totes les masses dels elements següents, són les masses finals de cadascuna de les peces del braç telescòpic. En un bon principi, com que encara no s'havia fet el disseny per SW de les peces, es van intuir les masses per a cadascuna d'elles. Un cop totes les peces van ser dimensionades, dissenyades i analitzades les seves tensions i deformacions es van canviar les masses presents en els càlculs del diagrama sòlid lliure per a optimitzar al màxim els resultats de les forces. Amb aquests nous resultats, es van refer els càlculs dels dimensionaments i de les anàlisis estructurals de tensions i deformacions per a comprovar que el

---

<sup>21</sup> Dada extreta d'MB92. *Empresa per al manteniment de iots en el Port Vell de Barcelona*. Veure en l'enllaç [<http://www.mb92.com/>]. Data de consulta [17/07/2016]. <sup>[1]</sup>

mecanisme seguia sent correcte. En els següents diagrames s'ha contemplat la massa final de cadascuna de les peces del braç robòtic, en alguns elements s'ha augmentat una certa mesura per així sobredimensionar el sistema fent que apareguin forces més grans del que tindrien d'aparèixer. Pel que fa als pesos dels diferents actuadors presents en el braç, són els detallats posteriorment en l'apartat especificacions dels actuadors. Els centres de gravetat on aniran aplicades aquestes masses s'han considerat en el centre geomètric de cada peça per així facilitar els càlculs de les forces que mantenen l'equilibri estàtic a cada peça.

Pel que fa a les dimensions dels elements i distàncies entre les diferents unions on es troben les forces de cada peça s'ha realitzat una cosa semblant a l'optimització de la massa anterior. En primera instància es van suposar una sèrie de mesures que posteriorment després dels dimensionaments, anàlisis estructurals i tria dels

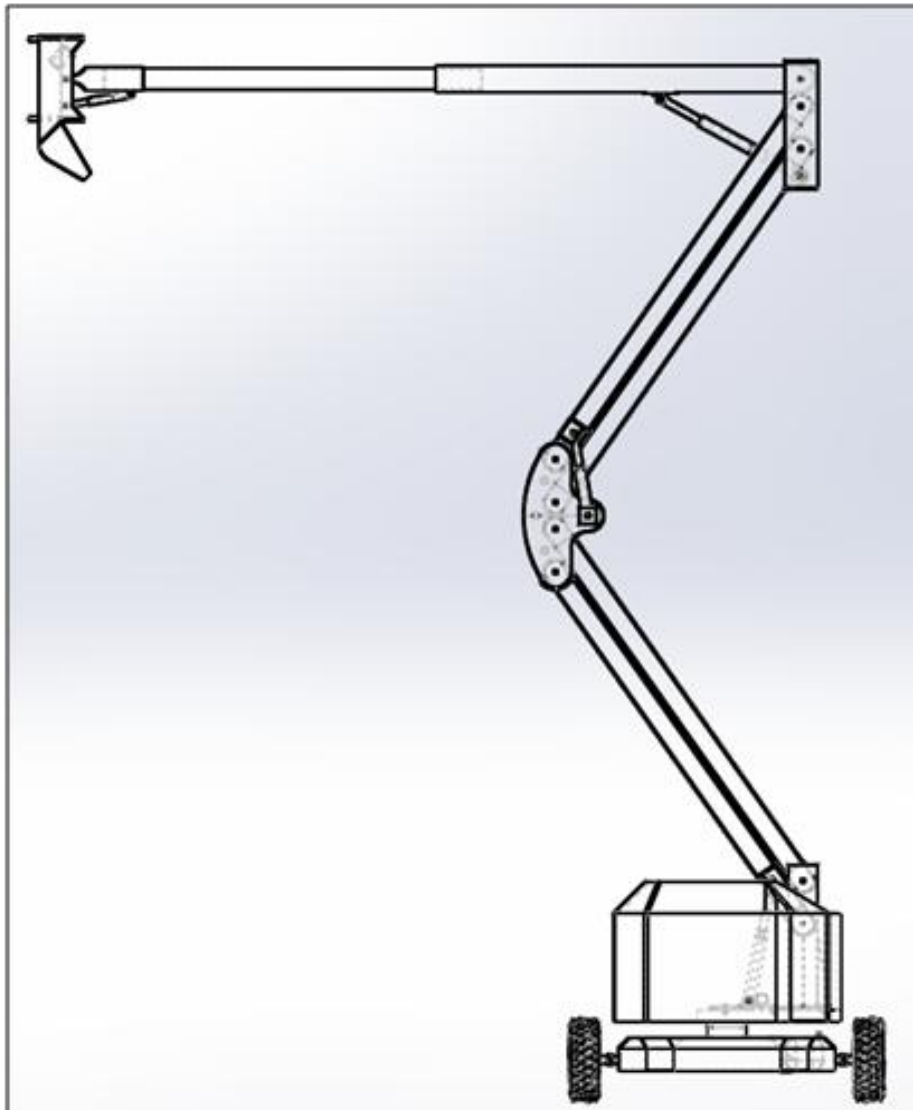


Figura 25: Configuració de l'assemblatge per al estudi de forces



diferents actuadors van acabar canviant. Per tant es van refer els càlculs amb les noves mesures que s'havien establert per a cada element. A l'igual que s'ha fet amb la massa dels elements, algunes d'aquestes dimensions són majors que les que trobarem en els plànols finals de cada peça. Amb això el que s'intenta és sobredimensionar els càlculs perquè acabin donant unes forces una mica majors del que haurien de donar. Els càlculs s'han dut a terme gràcies a la utilització del TQM (teorema de la quantitat de moviment) i el TMC (teorema del moment cinètic). La Figura 25 mostra la configuració del braç escollida per a l'estudi de les forces que intervindran en cada element del braç robòtic. Aquesta configuració és per a  $\alpha=55^\circ$ ,  $\beta=0^\circ$ ,  $\gamma=0^\circ$  i l'allargament màxim del braç telescòpic considerat infinitament rígid. L'anàlisi per tant, serà en 2D i considerant cada peça en equilibri estàtic.

### 8.1.1. Braç telescòpic.

Per dur a terme aquest diagrama, s'ha considerat que l'assemblatge del braç telescòpic es troba en la seva posició de màxim allargament i és infinitament rígid. En la Figura 26 es pot observar el diagrama del sòlid lliure del braç telescòpic. Les forces en vermell representen les reaccions a calcular en la peça mentre que les forces en blau són les forces externes que actuen sobre el sòlid i la força interna de la massa del telescòpic. El punt C que no forma part del sòlid braç telescòpic, representa l'ancoratge en l'articulació del telescòpic de l'actuador que permet la rotació  $\beta$ . La força  $mg$  del diagrama representa el pes propi del braç telescòpic.

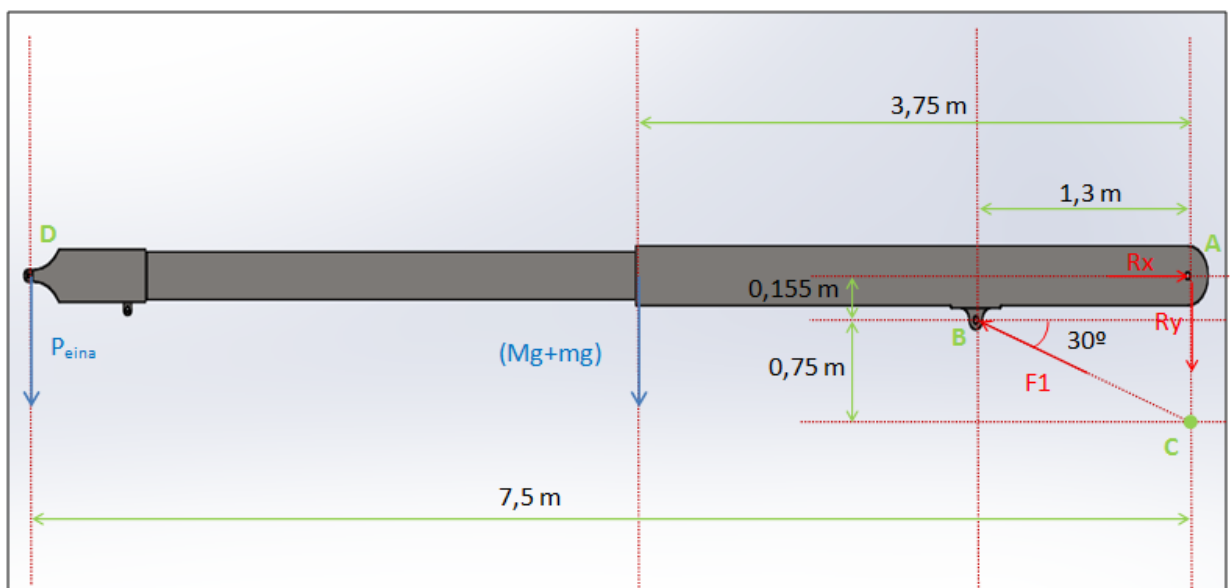


Figura 26: Diagrama de forces braç telescòpic

(suposat d'uns 500 kg aproximadament) aplicat en el seu centre de gravetat, mentre que la força  $Mg$  representa el pes propi de la mànega d'execució de la granalla que passa per sobre de tot el braç telescòpic.

**Dades:**

$$P_{eina} = 750 \text{ N } (76,5 \text{ kg})$$

$$mg = 4905 \text{ N } (500 \text{ kg})$$

$$Mg = 3 \left[ \frac{kg}{m} \right] \cdot 7,5[m] \cdot 9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] = 220,725 \text{ N}$$

**TQM:**

$$\circ \quad \sum F_x = 0$$

$$R_x = F_1 \cos 30$$

$$\circ \quad \sum F_y = 0$$

$$R_y + Mg + mg + P_{eina} = F_1 \sin 30$$

**TMC:**

$$\circ \quad \sum M(A) = 0$$

$$F_1 \cos 30 \cdot 0,155 + F_1 \sin 30 \cdot 1,3 = (Mg + mg) \cdot 3,75 + P_{eina} \cdot 7,5$$

**Resultats:**

$$R_x = 27.437,8 \text{ N}$$

$$R_y = 9.965,5 \text{ N}$$

$$F_1 = 31.682,47 \text{ N}$$

### 8.1.2. Articulació del telescòpic.

Per mitjà del teorema acció-reacció, s'ha trobat els sentits i les direccions de les forces que actuen sobre l'articulació i que provenen del braç telescòpic ( $R_y'$  i  $R_x'$ ). Mitjançant el mateix teorema també s'ha trobat el sentit i la direcció de la força realitzada per l'actuador que permet la rotació  $\beta$ , la força  $F_1$ . Per tant, aquestes tres forces tindran el mateix mòdul i direcció que les calculades anteriorment però sentit contrari. En aquest sistema a més a més, s'haurà de tenir en compte el pes de la mànega ( $P_m$ ) d'execució de la granalla que penja des d'aquesta articulació fins a arribar a terra. Aquesta força del pes es considerarà que actua en el punt A i que la

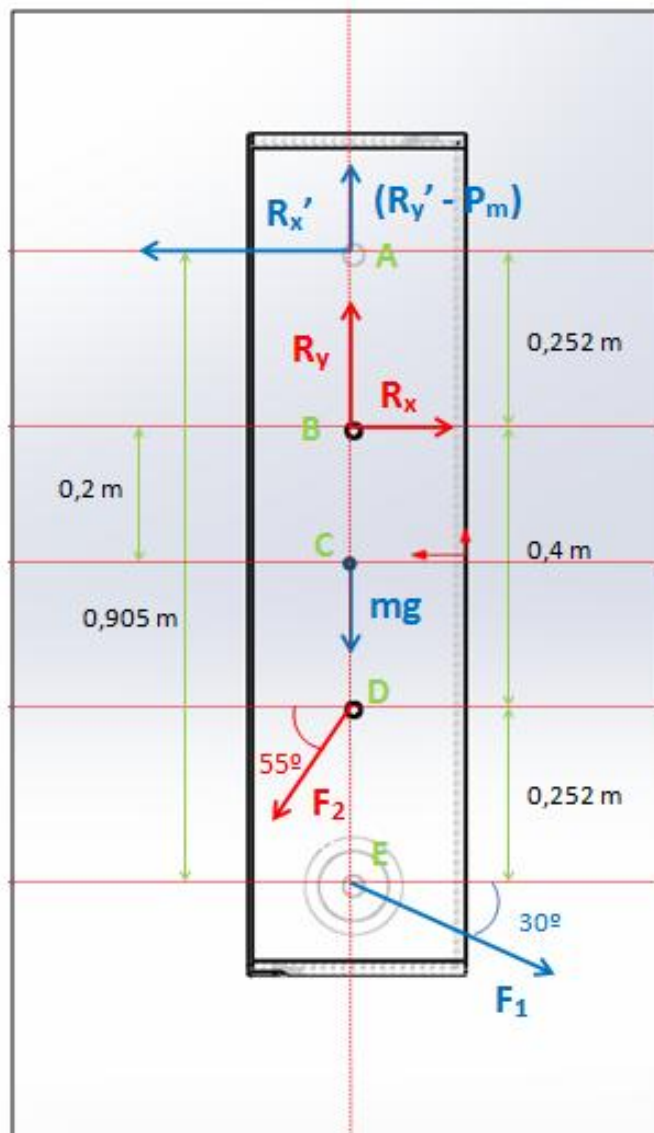


Figura 27: Diagrama de forces en l'articulació del telescòpic

distància de mànega penjant fins a terra serà de 9,2 m, que és l'altura del braç articulat com es pot observar en la Figura 16. En la Figura 27 es pot observar el diagrama de forces.

Els punts A, B, D i E representen les unions de l'articulació. La unió A és amb el braç telescòpic, la unió B és amb el braç superior del segon segment del braç articulat, la unió D és amb el braç inferior del segon segment i la unió E és amb l'actuador que permet la rotació  $\beta$ . El punt C no és cap unió, simplement indica el CG de la peça. Per a fer aquest anàlisi s'ha tingut en compte una simplificació important, que és considerar que el braç inferior del segon segment només fa força en la direcció de la barra (braç de força axial). Aquesta consideració és deguda a que aquest braç és biarticulat i no rep cap altra força externa. A diferència del braç superior del mateix segment, que rep la força externa dels actuadors número 4 com es pot observar en la Figura 14, al no rebre ninguna força externa de ningun actuador s'han simplificat els càlculs fent que la força sigui en la direcció de la barra. Aquesta força per tant, tindrà un angle respecte a l'horitzontal de  $55^\circ$  ja que  $\alpha=55^\circ$ . El seu sentit però, s'haurà d'establir aplicant el TQM i el TMC. En el punt B, a diferència del punt D, com la barra a la que està unida rep forces externes (no està birecolzada) es tindrà una força vertical i una altra d'horitzontal a resoldre.

Per a la mg s'ha tingut en compte: la massa de la mateixa articulació (200 kg), la massa del braç inferior del primer segment (100 kg) i la massa del actuador de la rotació  $\beta$  (23 kg). Al fer la simplificació del braç de força axial (fa una força del mateix mòdul en cada un dels dos extrems, en la direcció de la barra i amb sentit contrari), s'ha de considerar l'element com un sòlid auxiliar d'enllaç (SAE); és a dir, un sòlid sense massa. Al no ser-ho en la realitat s'ha aproximat el càlcul implementant la seva massa en l'articulació del telescòpic. Amb l'actuador de la rotació  $\beta$  passa una cosa similar, ja que també s'ha considerat un SAE i per tant, fa força només en la direcció de l'actuador. Al no haver-se considerat la seva massa, per aproximar els càlculs es considera tota la seva massa en l'articulació.

**Dades:**

$$R'_y = 9.965,5 \text{ N}$$

$$P_m = 3 \left[ \frac{kg}{m} \right] \cdot 9,2[m] \cdot 9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] = 271 \text{ N}$$

$$R'_x = 27.437,8 \text{ N}$$

$$mg = (200 + 100 + 23) \cdot 9,81 = 3.168,6 \text{ N}$$

$$F_1 = 31.682,4 \text{ N}$$

**TQM:**

- $\sum F_x = 0$

$$R_x + F_1 \cos 30 = R'_x + F_2 \cos 55$$

- $\sum F_y = 0$

$$R_y + R'_y = F_2 \sin 55 + F_1 \sin 30 + mg + P_m$$

**TMC:**

- $\sum M(C) = 0$

$$R'_x \cdot 0,65 + F_1 \cos 30 \cdot 0,25 = R_x \cdot 0,4$$

**Resultats:**

$$R_x = 62.078,03 \text{ N}$$

$$R_y = 97.972,55 \text{ N}$$

$$F_2 = 108.229,7 \text{ N}$$

### 8.1.3. Braç superior segon segment.

En aquesta anàlisi les forces externes que s'aplicaran al sistema són les calculades per mitjà del mètode acció-reacció de l'apart anterior ( $R_x'$  i  $R_y'$ ). Aquest provindran de la resultant horitzontal i vertical calculada en la unió B de l'apartat anterior. En la Figura 28 es pot observar el diagrama del sòlid lliure de la peça. L'angle de  $55^\circ$  és al que es deu a l'obertura  $\alpha$  del braç articulat.

Entre les reaccions a calcular es troba: les de la unió A que són les reaccions que l'articulació del paral·lelogram fa sobre l'element a estudiar, mentre que la  $F_3$  (unió B) és la força que fan el parell d'actuadors número 4 de la Figura 14 sobre l'element.

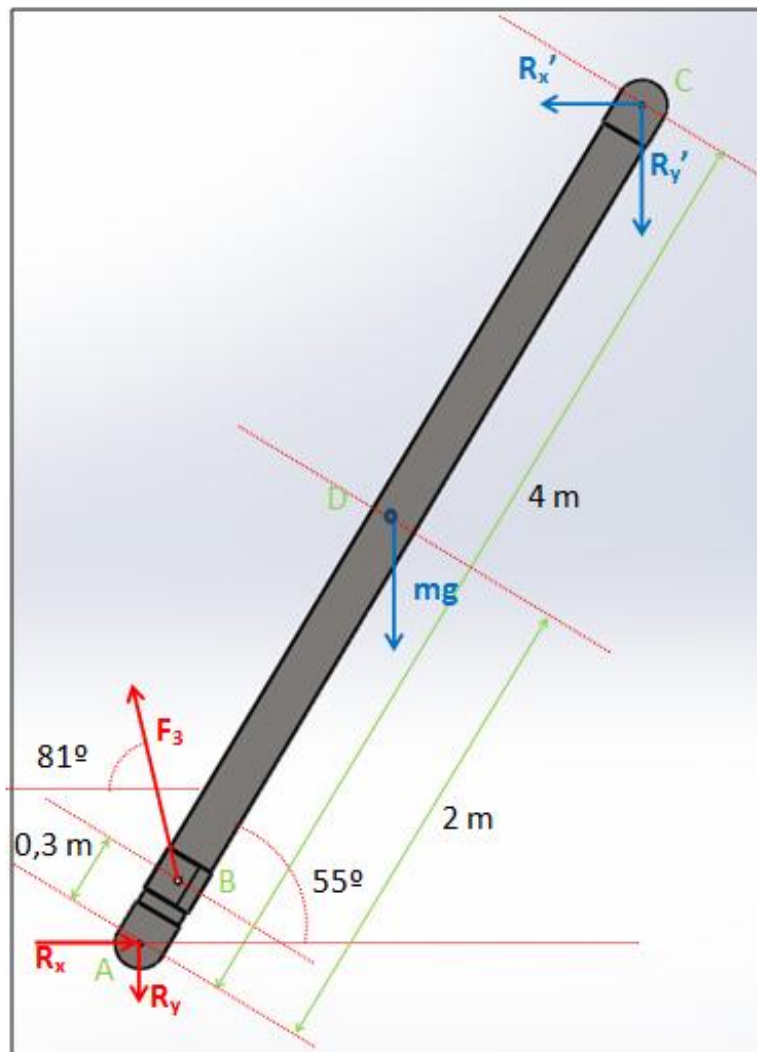


Figura 28: Diagrama del sòlid lliure barra superior segon segment

Aquesta força té definida la direcció, ja que s'utilitzarà la mateixa hipòtesi anterior que per a l'actuador de la rotació  $\beta$ . L'actuador serà un SAE fent la força dels seus dos extrems en la direcció de l'actuador. L'angle d'aquest actuador amb l'horitzontal s'ha calculat en l'assemblatge del model CAD i es mostra en la següent Figura 29. En aquesta Figura 29 l'assemblatge té la mateixa configuració que l'ha que s'està analitzant en aquest apartat, per tant l'angle d'obertura del braç articulat ( $\alpha$ ) és  $55^\circ$ .

Mentre que els punts A, B i C són unions on es situaran els passadors el punt D és el CG on s'aplicarà el pes de la barra superior del segon segment. Del braç inferior del segon segment no es realitzarà diagrama perquè al ser de força axial (SAE) la força que fa en un extrem és la mateixa en mòdul i direcció que la de l'altre extrem però en sentit contrari.

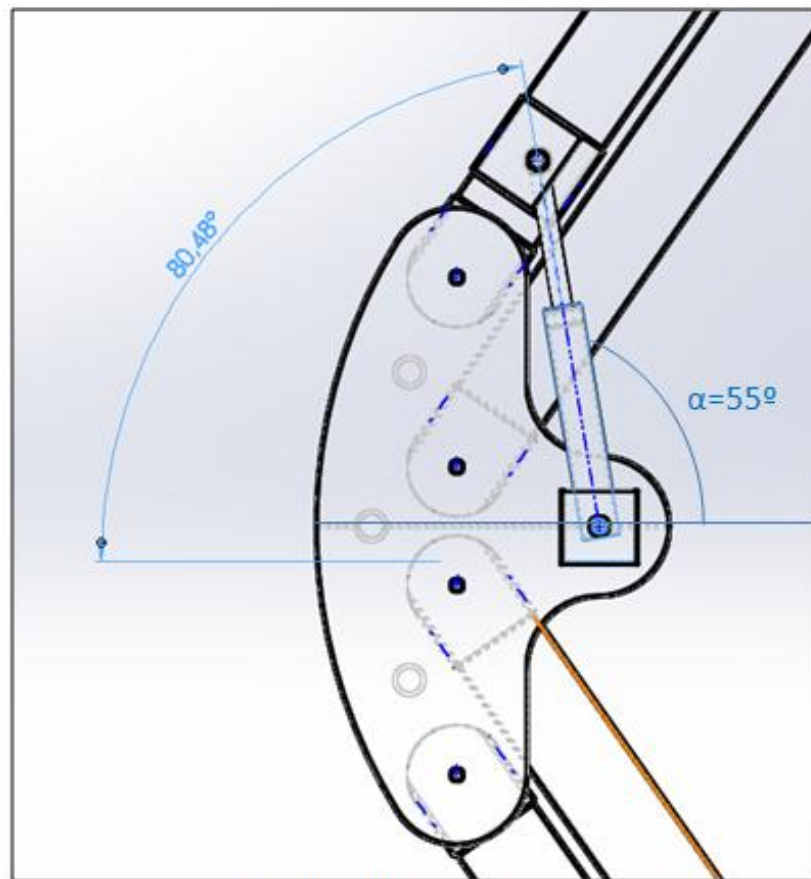


Figura 29: Angle d'incidència d' $F_3$



**Dades:**

$$R'_x = 62.078,03 \text{ N}$$

$$R'_y = 97.972,55 \text{ N}$$

$$mg = 981 \text{ N (100 kg)}$$

**TQM:**

- $\sum F_x = 0$

$$R_x = F_3 \cos 81 + R'_x$$

- $\sum F_y = 0$

$$R_y + R'_y + mg = F_3 \sin 81$$

**TMC:**

- $\sum M(A) = 0$

$$\begin{aligned} F_3 \sin 81 \cdot 0,3 \cdot \cos 55 + F_3 \cos 81 \cdot 0,3 \cdot \sin 55 + R'_x \cdot 4 \cdot \sin 55 \\ = mg \cdot 2 \cdot \cos 55 + R'_y \cdot 4 \cdot \cos 55 \end{aligned}$$

**Resultats:**

$$R_x = 78.560,96 \text{ N}$$

$$R_y = 8.258,95 \text{ N}$$

$$F_3 = 108.472,15 \text{ N}$$

#### 8.1.4. Articulació paral·lelogram.

Com es pot observar en la Figura 30, aquest serà el diagrama de forces per a l'articulació. En referència a les forces que intervindran externes al sistema es tindrà: en la unió E es trobaran les dues forces (vertical i horitzontal) per acció-reacció del braç superior segon segment, en la unió D la constituirà la força axial que fa el braç inferior del segon segment (SAE) i la unió C serà la força axial  $F_3$  del parell d'actuadors. Pel que fa a la massa que es considerarà en el punt F de la imatge, aquesta força tindrà en compte les següents masses: 114 kg de l'articulació, 100 kg

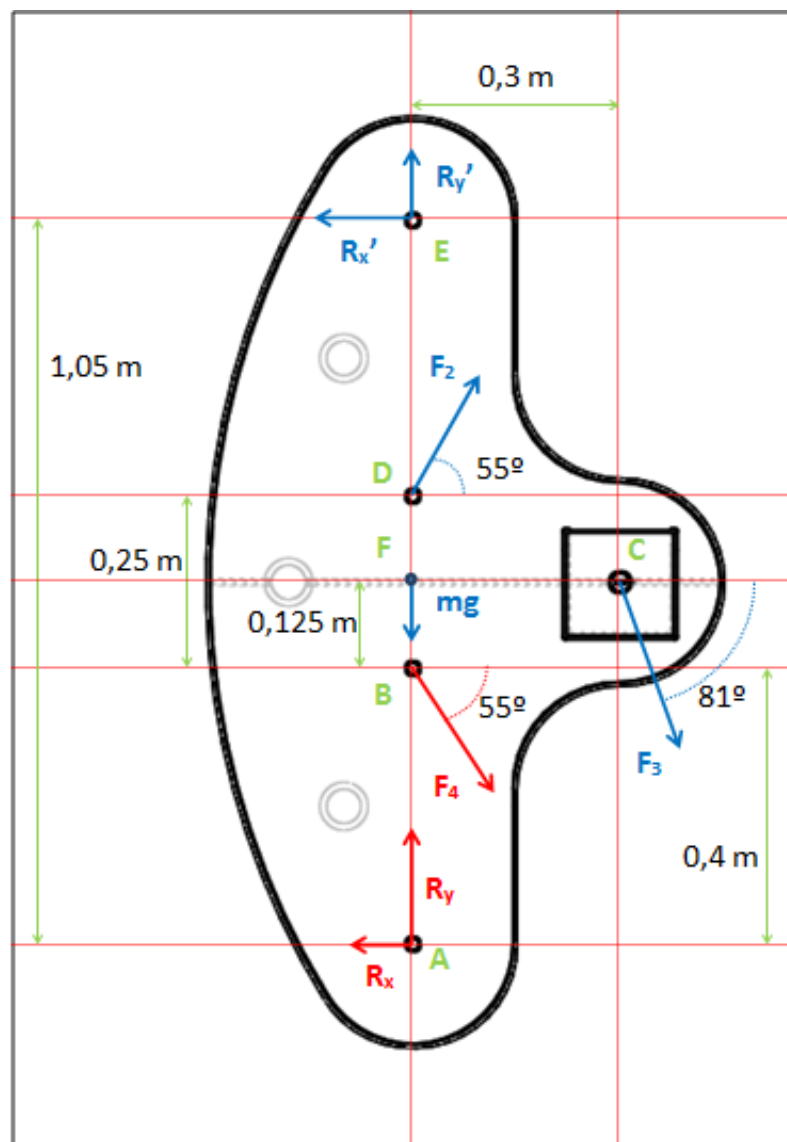


Figura 30: Diagrama del sòlid lliure articulació paral·lelogram del braç superior del primer segment i 26 kg del parell d'actuadors. Les últimes dues

masses es consideraran en l'articulació perquè al considerar-se els seus elements sòlids auxiliars d'enllaç sense massa, per fer més aproximat el càlcul es consideren en l'articulació. La reacció resultant en la unió B és unidireccional, ja que forma part de la barra de força axial (SAE) superior del primer segment. Mentre que la reacció en la unió A té dues components, ja que el braç inferior del primer segment rep la força externa del parell d'actuadors número 3 en la Figura 14.

### Dades:

$$R'_x = 78.560,96 \text{ N}$$

$$R'_y = 8.258,95 \text{ N}$$

$$F_2 = 108.229,7 \text{ N}$$

$$F_3 = 108.472,15 \text{ N}$$

$$mg = (114 + 100 + 26) \cdot 9,81 = 2.354,4 \text{ N}$$

### TQM:

$$\circ \sum F_x = 0$$

$$R_x + R'_x = F_2 \cos 55 + F_3 \cos 81 + F_4 \cos 55$$

$$\circ \sum F_y = 0$$

$$R_y + R'_y + F_2 \sin 55 = F_3 \sin 81 + F_4 \sin 55 + mg$$

### TMC:

$$\circ \sum M(A) = 0$$

$$F_4 \cos 55 \cdot 0,4 + F_2 \cos 55 \cdot 0,65 + F_3 \cos 81 \cdot 0,525 + F_3 \sin 81 \cdot 0,3 = R'_x \cdot 1,05$$

**Resultats:**

$$R_x = 3.302,5 \text{ N}$$

$$R_y = 17.367,89 \text{ N}$$

$$F_4 = 5.757,8 \text{ N}$$

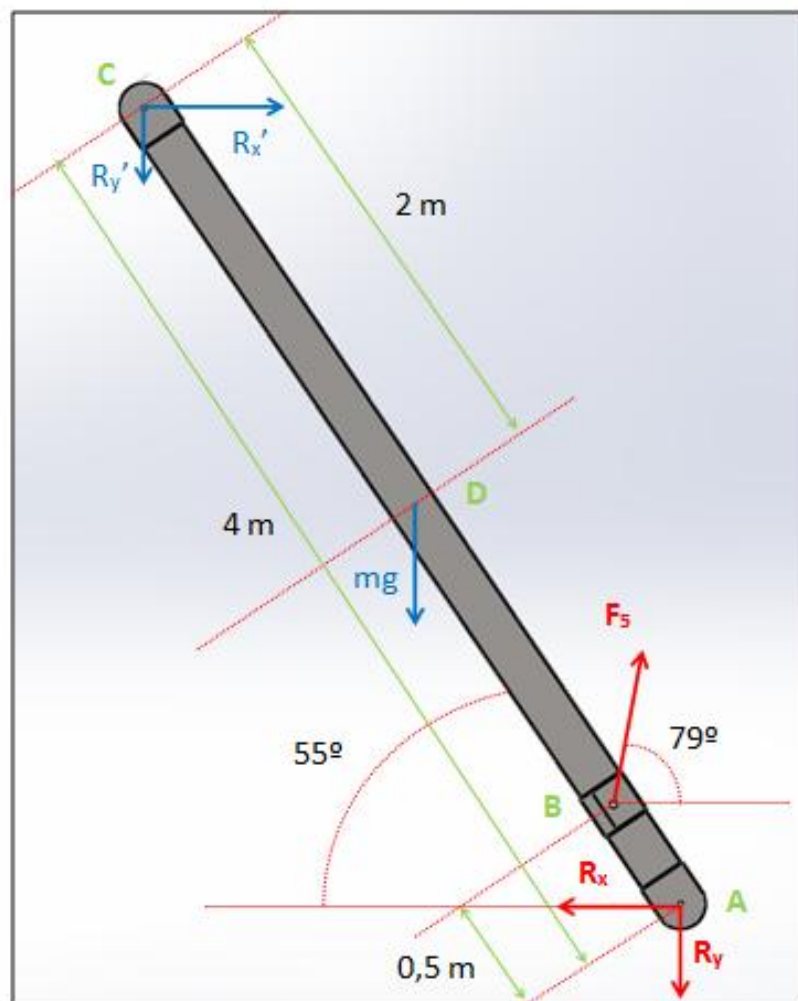
**8.1.5. Barra inferior primer segment.**

Figura 31: Diagrama de forces braç inferior primer segment

En la Figura 31 es pot observar el diagrama del sòlid lliure d'aquest element. En la unió C es representa les dues forces (horitzontal i vertical) exercides sobre la peça per l'articulació del paral·lelogram. La reacció de la unió B té la direcció definida, ja que és el parell d'actuadors de força axial (SAE) qui la provoca, per tant té la direcció d'aquestos. Aquesta té una inclinació sobre l'horitzontal de  $79^\circ$  com es pot observar en la Figura 32. Tota la peça està inclinada sobre l'horitzontal seguint la mateixa rotació  $\alpha=55^\circ$  del braç articulat. La unió A, tindrà una reacció horitzontal i una altra de vertical, ja que aquesta peça no es pot considerar de força axial. Això és degut a la presència de la força externa del parell d'actuadors que permeten la rotació  $\alpha$  del braç articulat, per tant, deixarà de ser un braç birecolzat i no es podrà simplificar els càlculs fent la força de l'altre extrem axial. En canvi, per al braç superior del primer segment no es realitzarà diagrama perquè al ser un SAE birecolzat, la força en l'altre extrem tindrà mateix mòdul i direcció, però sentit contrari.

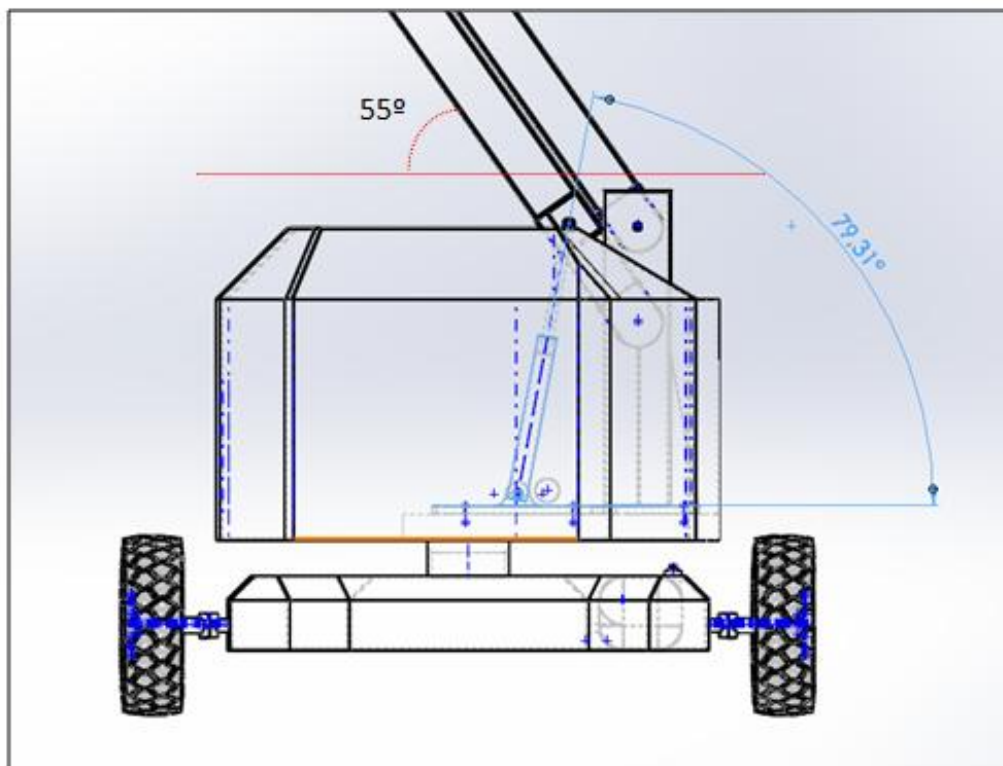


Figura 32: Direcció de la força  $F_5$

**Dades:**

$$R'_y = 17.367,89 \text{ N}$$

$$R'_x = 3.302,5 \text{ N}$$

$$mg = 981 \text{ N (100 kg)}$$

**TQM:**

○  $\sum F_x = 0$ :

$$R_x = R'_x + F_5 \cos 79$$

○  $\sum F_y = 0$ :

$$R_y + R'_y + mg = F_5 \sin 79$$

**TMC:**

○  $\sum M(A) = 0$ :

$$\begin{aligned} & R'_y \cdot 4 \cdot \cos 55 + mg \cdot 2 \cdot \cos 55 \\ &= R'_x \cdot 4 \cdot \sin 55 + F_5 \cos 79 \cdot 0,5 \cdot \sin 55 + F_5 \sin 79 \cdot 0,5 \cdot \cos 55 \end{aligned}$$

**Resultats:**

$$R_x = 19.151,58 \text{ N}$$

$$R_y = 64.151,73 \text{ N}$$

$$F_5 = 84.009,2 \text{ N}$$

### 8.1.6. Articulació fixa.

La Figura 33 es pot observar el diagrama del sòlid lliure de l'articulació fixa. Les unions A i C tenen una força amb la direcció definida, com que provenen de sòlids auxiliars d'enllaç, una força ( $F_5$ ) del parell d'actuadors número 3 de la Figura 14 mentre que l'altra força ( $F_4$ ) del braç superior del primer segment, tots ells simplificats en el teorema de força axial per al braç sense massa. La unió B presenta dues forces externes (horitzontal i vertical) provinents del braç inferior del primer segment. El punt E és el CG de la peça i en ell es considerarà tant la massa de l'articulació (300 kg) com també la del parell d'actuadors que permeten la rotació  $\alpha$  del braç articulat (34 kg). El punt D serà el situat en la meitat de la llargada total de

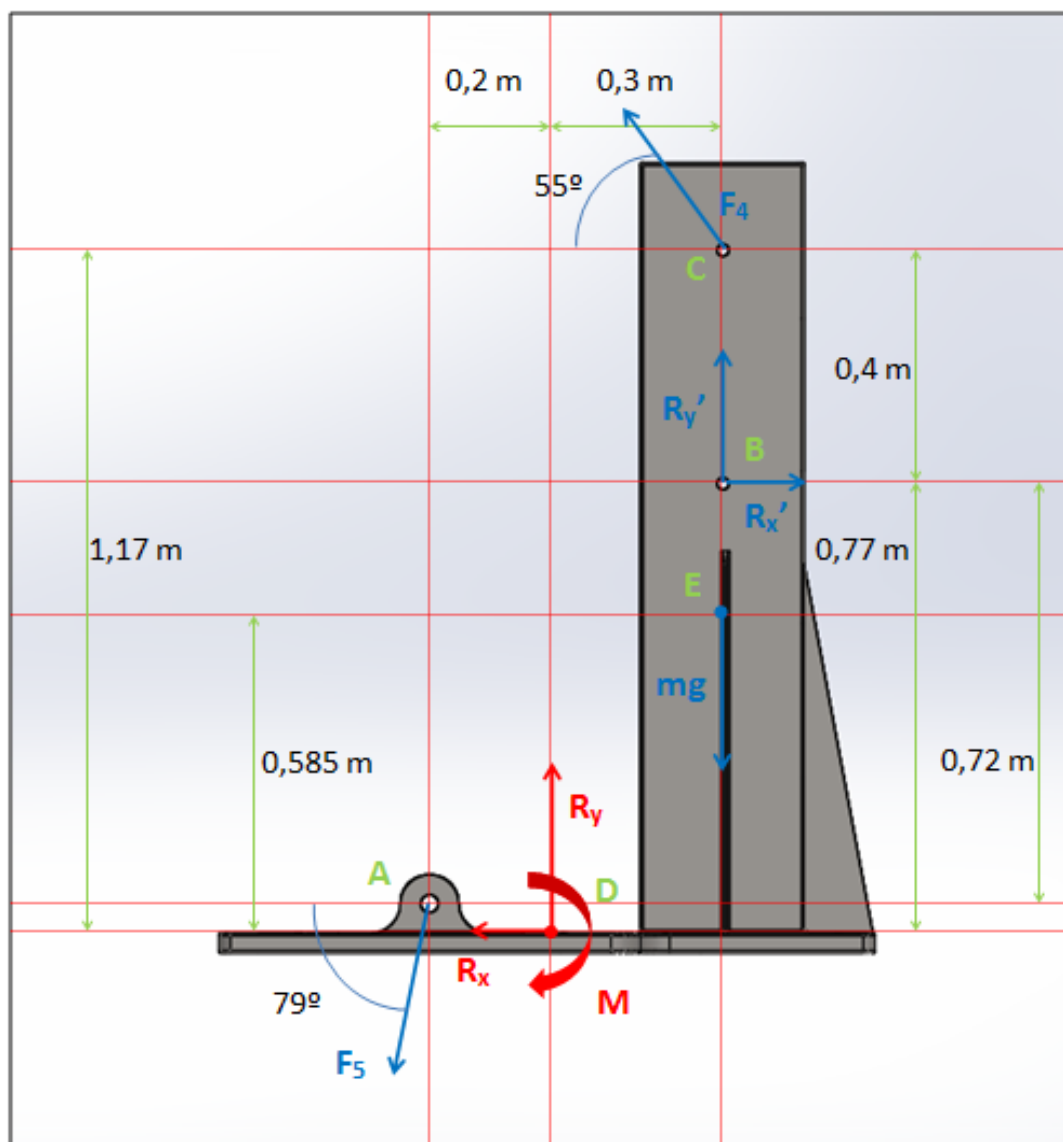


Figura 33: Diagrama de forces per l'articulació fixa



l'articulació fixa, i com que no és una unió amb un passador que permet la lliure rotació al voltant del seu eix, tindrà les 3 restriccions de moviment en el pla; el desplaçament vertical i horitzontal alhora que el gir al voltant del punt. Les reaccions es poden observar en la Figura 33.

**Dades:**

$$F_4 = 5.757,8 \text{ N}$$

$$R'_y = 64.151,73 \text{ N}$$

$$R'_x = 19.151,58 \text{ N}$$

$$F_5 = 84.009,2 \text{ N}$$

$$mg = (300 + 34) \cdot 9,81 = 3.276,54 \text{ N}$$

**TQM:**

○  $\sum F_x = 0$ :

$$R_x + F_4 \cos 55 + F_5 \cos 79 = R'_x$$

○  $\sum F_y = 0$ :

$$R_y + R'_y + F_4 \sin 55 = F_5 \sin 79 + mg$$

**TMC:**

○  $\sum M(D) = 0$ :

$$\begin{aligned} F_5 \cos 79 \cdot 0,05 + F_5 \sin 79 \cdot 0,2 + F_4 \cos 55 \cdot 1,17 + F_4 \sin 55 \cdot 0,3 + R'_y \cdot 0,3 \\ = R'_x \cdot 0,77 + mg \cdot 0,3 + M \end{aligned}$$

**Resultats:**

$$R_x = -0,04 \text{ N} \approx 0 \text{ N}$$

$$R_y = 16.908,91 \text{ N}$$

$$M = 26.087,34 \text{ Nm}$$

**8.2. Dimensionament del perfil en els braços del primer i segon segment.**

Per a l'elecció de quin tipus de perfil s'utilitzarà per fer les dues barres de cadascun dels dos segments del braç articulat, s'ha raonat bàsicament que aquestes barres estan sotmeses a un esforç normal majoritàriament, per tant la millor elecció és el perfil rectangular de tub que suporta de forma molt adient el esforç normal. Com es pot comprovar en la Parma16D (veure Figura 1), els perfils que utilitza l'empresa MATILSA per a fer les dues barres de cada segment són també perfils rectangulars.

Un cop fet aquesta elecció de quin tipus de perfil, s'haurà de dimensionar les seves mesures. Per a fer el dimensionament serà necessari trobar quina és la secció més crítica de les barres en el braç articulat. Per tant, s'han creat els diagrames d'esforços de secció per aquelles barres que estan en contacte amb els cilindres hidràulics, és a dir, la barra superior del segon segment i la barra inferior del primer segment. Les altres dues barres, degut a que seran barres rectangulars que només estan sotmeses a esforços normals s'ha prescindit del seu càlcul perquè la barra rectangular aguanta molt bé l'esforç normal. Aquestes dues barres de força axial no seran un problema, ja que al calcular els esforços normals en la barra no seran tan crítics com en les altres dues, que al actuar els cilindres hidràulics sorgeix un moment flector i una força tangencial provocant un esforç total més gran que en les de força axial. Per tant en els dos subapartats següents es realitzarà el diagrama d'esforços d'aquestes dues barres:

### 8.2.1. Diagrama d'esforços de la barra superior segon segment.

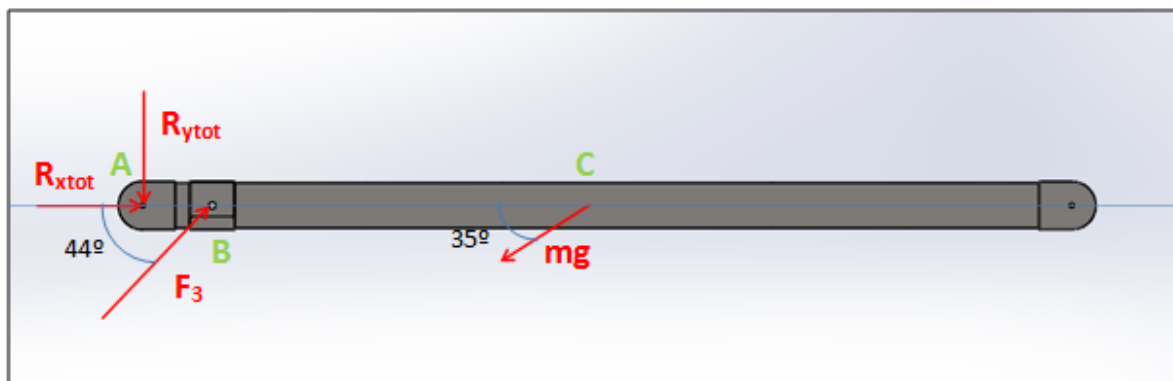


Figura 32: Forces horitzontals i vertical en el braç superior segon segment

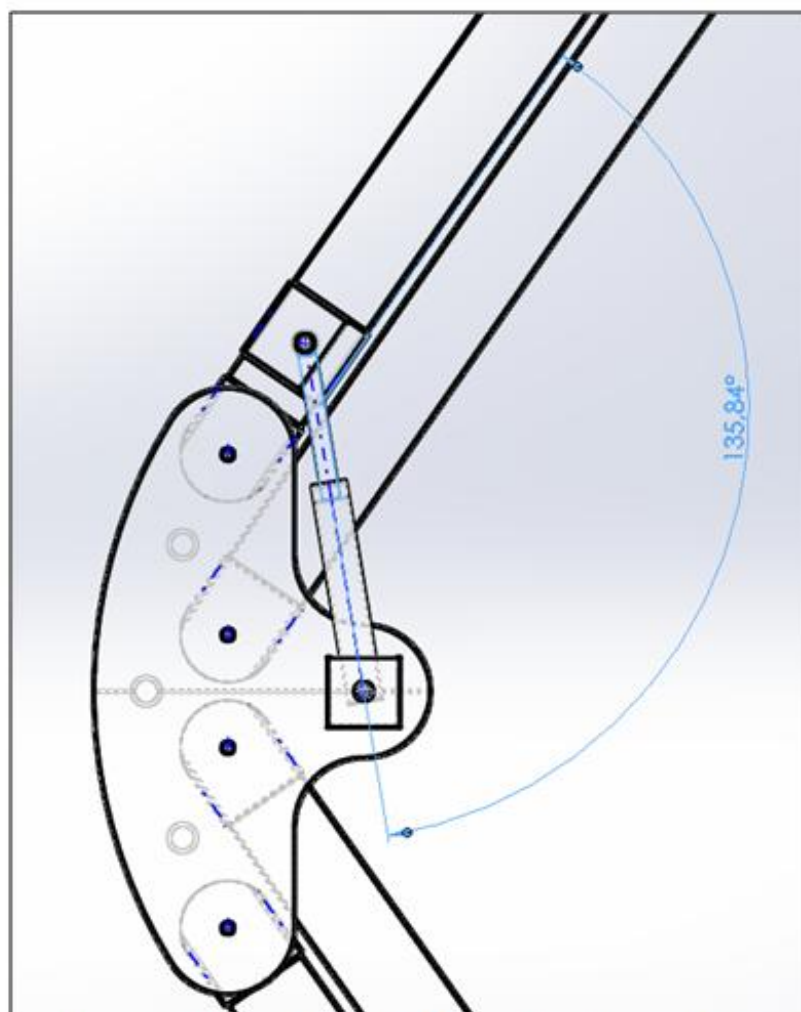


Figura 33: Angle d' $F_3$  respecte la direcció de la barra

En aquesta peça primer es calcularan totes les forces presents en la direcció de la barra i en la seva perpendicular a partir de les trobades en l'apartat anterior. La següent Figura 32 mostra la representació d'aquestes forces.

La Figura 33 mostra l'angle d'incidència de la força  $F_3$  respecte la direcció de la barra superior del segon segment. Per tant, l'angle d'incidència de la mateixa força que apareix en la Figura 32 ( $44^\circ$ ), és el seu angle suplementari. L'angle de  $35^\circ$  per al pes propi de la barra sorgeix ja que és l'angle complementari a  $55^\circ$  (inclinació de la barra en la configuració analitzada en l'apartat anterior). Les forces incidents en la unió A es calcularan a partir de les projeccions horitzontals i verticals de les forces  $R_x$  i  $R_y$  representades en la Figura 28 de valor  $R_x=78.560,96 \text{ N}$  i  $R_y=8.258,95 \text{ N}$ . Les mesures del braç, com és lògic seran les mateixes que les exposades en la Figura 28. Per tant, els càlculs dels esforços en cada secció es calcularan per trams i seran els següents:

#### Dades:

$$R_{xtot} = R_x \cos 55 - R_y \sin 55 = 38.295,38 \text{ N}$$

$$R_{ytot} = R_x \sin 55 + R_y \cos 55 = 69.090,51 \text{ N}$$

$$F_3 = 108.472,15 \text{ N}$$

$$mg = 981 \text{ N}$$

**Tram A-B:**  $0 \leq x \leq 0,3\text{m}$

$$N = -38.295,38 \text{ N}$$

$$T = -69.090,51 \text{ N}$$

$$M = -69.090,51 \cdot x \begin{cases} 0 \text{ Nm} \\ -20.727,15 \text{ Nm} \end{cases}$$

**Tram B-C:**  $0 \leq x \leq 1,7\text{m}$

$$N = -38.295,38 - F_3 \cos 44 = -116.323,71 \text{ N}$$

$$T = -69.090,51 + F_3 \sin 44 = 6.260,57 \text{ N}$$

$$M = -69.090,51 \cdot (x + 0,3) + F_3 \sin 44 \cdot x \begin{cases} -20.727,15 \text{ Nm} \\ -10.084,17 \text{ Nm} \end{cases}$$

**Tram C-Final:**  $0 \leq x \leq 2\text{m}$

$$N = -116.323,71 + mg \cos 35 = -115.520,12 \text{ N}$$

$$T = 6.260,57 - mg \sin 35 = 5.697,89 \text{ N}$$

$$M = -69.090,51 \cdot (x + 2) + F_3 \sin 44 \cdot (x + 1,7) - mg \sin 35 \cdot x \begin{cases} -10.084,17 \text{ Nm} \\ 1.311,62 \text{ Nm} \end{cases}$$

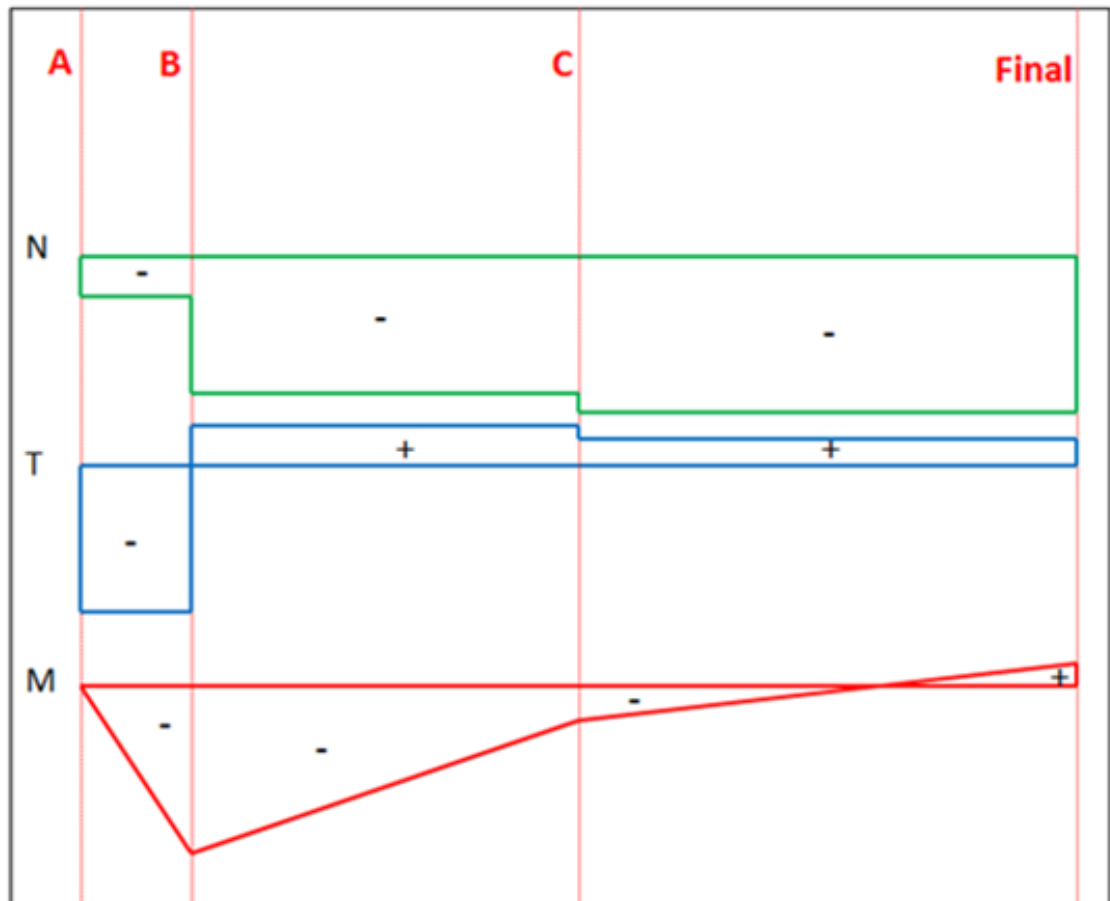


Figura 34: Diagrames d'esforços de secció

Amb aquests càlculs d'esforç normal, tallant i moment flector es pot comprovar que la secció crítica serà la B representada en la Figura 32. S'haurà de valorar però, que aquesta mateixa secció per el cantó esquerra tindrà uns esforços representats en verd mentre que per el costat dret uns altres representats amb vermell. Per a que el dimensionament sigui correcte doncs, s'haurà de tenir en compte els dos costats de la secció crítica; degut a que, un té més normal i menys tallant i l'altre viceversa. En la següent Figura 34 podem veure representats els diferents esforços al llarg del braç superior del segon segment.

### 8.2.2. Diagrama d'esforços barra inferior primer segment.

S'estudiaran totes les forces que actuen en aquesta barra, tenint en compte les seves projeccions en la direcció de la barra i en la seva perpendicular, com es pot observar en la Figura 35. Per a la unió A es pot apreciar les dues forces resultants en projectar les forces  $R_x'$  i  $R_y'$  representades en la Figura 31 sobre la direcció de la barra i la seva perpendicular, aquestes són  $R_x'=3.302,5$  N i  $R_y'=17.367,89$  N. L'angle de la força  $mg$  és el complementari de l'obertura  $\alpha=55^\circ$ , mentre que la inclinació d' $F_5$  sobre la direcció de la barra és l'angle suplementari del representat en la Figura 36.

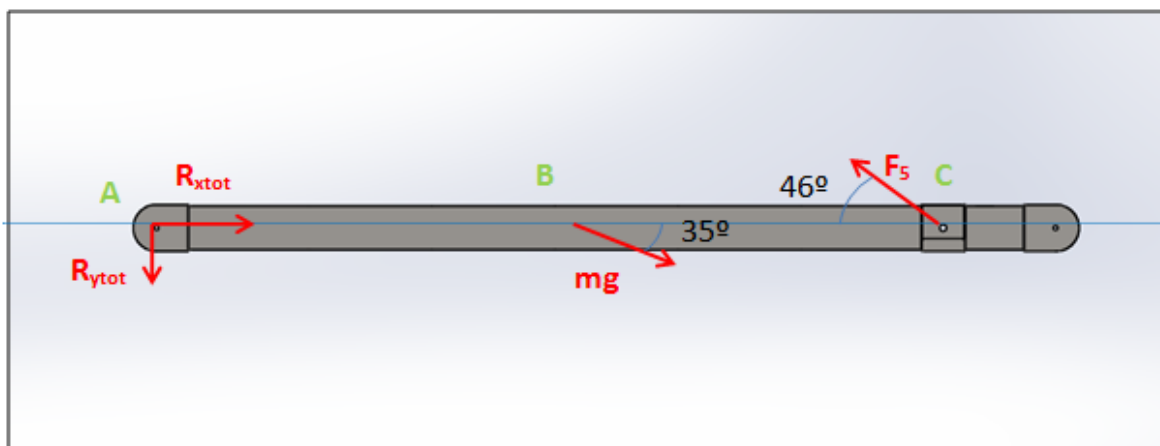


Figura 35: Forces en la barra inferior primer segment

**Dades:**

$$R_{xtot} = R_x' \cos 55 + R_y' \cos 35 = 16.121,18 \text{ N}$$

$$R_{ytot} = R_y' \sin 35 - R_x' \sin 55 = 7.256,56 \text{ N}$$

$$mg = 981 \text{ N}$$

$$F_5 = 84.009,2 \text{ N}$$

**Tram A-B:**  $0 \leq x \leq 2\text{m}$ :

$$N = -16.121,18 \text{ N}$$

$$T = -7.256,56 \text{ N}$$

$$M = -7.256,56 \cdot x \begin{cases} 0 \text{ Nm} \\ -14.513,12 \text{ Nm} \end{cases}$$

**Tram B-C:**  $0 \leq x \leq 1,5\text{m}$ :

$$N = -16.924,77 \text{ N}$$

$$T = -7.819,24 \text{ N}$$

$$M = -7.256,56 \cdot (x + 2) - mg \sin 35 \cdot x \begin{cases} -14.513,12 \text{ Nm} \\ -26.241,98 \text{ Nm} \end{cases}$$

**Tram C-Final:**  $0 \leq x \leq 0,5\text{m}$ :

$$N = +41.432,92 \text{ N}$$

$$T = +52.611,92 \text{ N}$$

$$M = -7.256,56 \cdot (x + 3,5) - mg \sin 35 \cdot (x + 1,5) + F_5 \sin 46 \cdot x \begin{cases} -26.241,98 \text{ Nm} \\ 63,98 \text{ Nm} \approx 0 \end{cases}$$

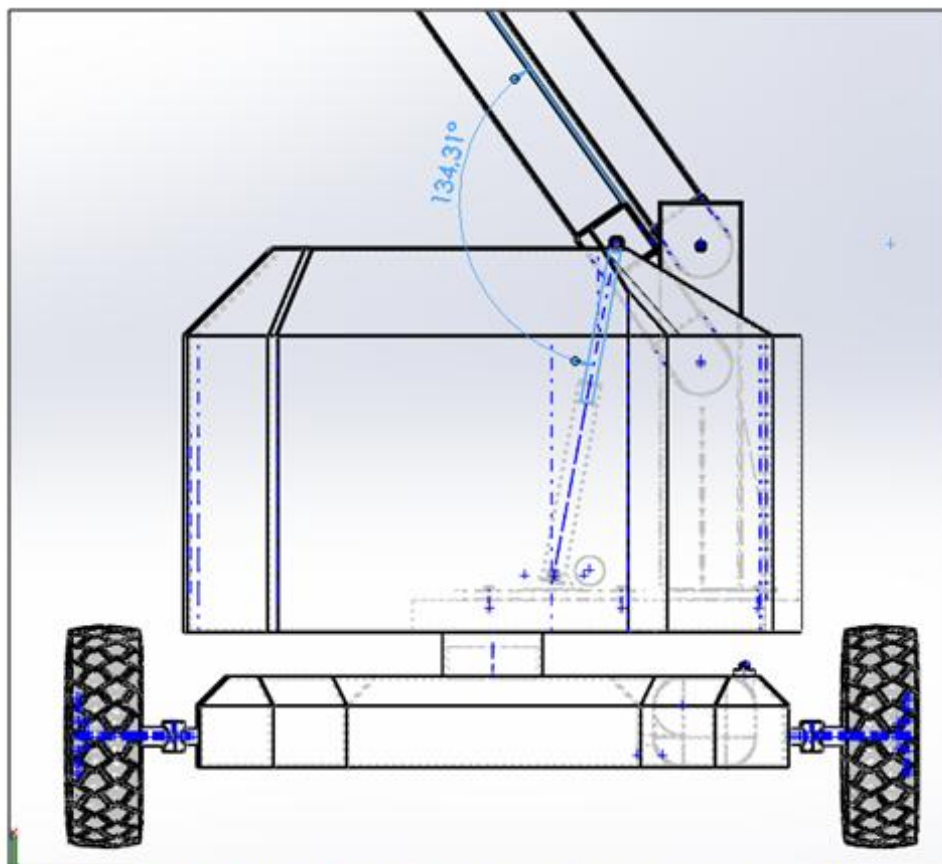


Figura 36: Angle d'incidència d' $F_5$  respecte la direcció de la barra



En aquest cas, els càlculs revelen que la secció a estudiar serà la secció C. S'estudiarà solament pel seu costat dret, ja que té una tallant i una normal més grans que el seu costat esquerre. Els esforços a considerar seran per tant, els pintats en vermell. La següent imatge es pot observar el diagrama d'esforços al llarg de la barra.

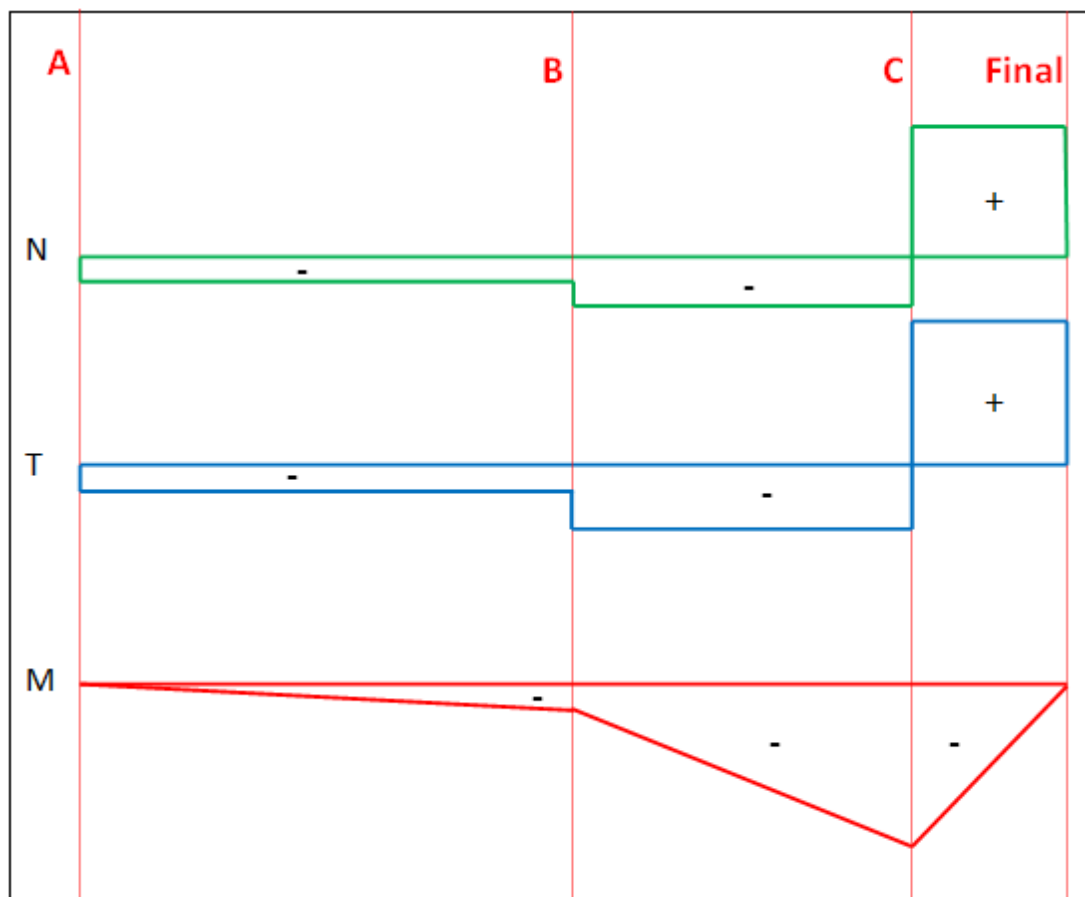


Figura 37: Diagrama d'esforços de secció al llarg de la barra

### 8.2.3. Càlcul de la secció adient.

Un cop trobades les seccions crítiques s'especificarà quin serà el material per a utilitzar per a construir tant la secció rectangular de cadascuna de les barres com les altres articulacions presents en el braç articulat. Aquest material serà un acer estructural al carboni anomenat AISI 1020 que té les següents propietats<sup>22</sup>:

$\sigma_{\text{elàstica}}=350 \text{ MPa}$
$\sigma_{\text{rotura}}=420 \text{ MPa}$
$E \text{ (mòdul de Young)}= 200.000 \text{ MPa}$
$N \text{ (coeficient de Poisson)}=0,29$
$\text{Densitat}= 7.900 \text{ kg/m}^3$

Arribat aquest punt en que s'ha decidit el material de fabricació del braç articulat a dissenyar i es tenen les seccions crítiques d'esforços es dimensionarà quina serà la secció rectangular a construir mitjançant la utilització d'aquest material i les seves propietats.

Es tindran les següents tensions en cadascuna de les tres seccions crítiques trobades anteriorment (totes les fórmules extretes del formulari de Resistència de Materials de l'escola ETSEIB<sup>23</sup>), aquestes són:

<sup>22</sup> AZO Materials. *Material AISI 1020*. Propietats definides en l'enllaç  
[<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9145>] Data de consulta [26/072016]. <sup>[9]</sup>

<sup>23</sup> UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. *Departament de Resistència de Materials (ETSEIB)*. Formulari de l'assignatura Resistència de Materials. <sup>[10]</sup>

- Tensió tallant perpendicular a la direcció del braç. La tensió tallant en les nostres seccions bé donada per la  $T$  calculada en cada secció crítica. En el cas d'una tallant negativa com en el cas de la primera secció crítica a analitzar la tensió que generaria tindria la direcció i sentit representats en groc en la següent Figura 38. Aquesta tensió s'anomena  $\tau_{xy}$ , ja que la generen les tensions tallants en l'eix  $Y$  ( $T_y$ ). La tensió tallant  $\tau_{xy}$  és màxima quan travessa l'eix  $z$ , en la següent imatge es mostra les tallants màximes en la secció. La fórmula de la tensió tallant per a seccions de paret prima serà doncs:

$$\tau_{xy} = \frac{T_y \cdot m_z}{e \cdot I_z}$$

Sent

$T_y \rightarrow$  força tallant vertical en l'eix  $Y$

$m_z \rightarrow$  (moment estàtic respecte l'eix  $z$ )

$$= \frac{A}{2} \cdot y_G \left\{ \begin{array}{l} A \rightarrow \text{Àrea de la secció} \\ y_G \rightarrow \text{Altura del centre d'inèrcia de mitja secció} \end{array} \right.$$

$e \rightarrow$  espessor

$I_z \rightarrow$  Inèrcia respecte l'eix  $z$

- Tensió normal paral·lela a la direcció del braç. En aquest cas tindrem una combinació d'esforços com es pot observar en la Figura 38, l'esforç normal de compressió  $N_x$  en vermell a la imatge i l'esforç flector  $M_z$  respecte l'eix  $z$  mostrat en verd a la imatge. Per tant, en aquest cas es tindrà una combinació d'esforços normals, ja que el moment respecte l'eix  $z$  també crea un esforç normal a costat i costat de l'eix. En la Figura 38 es pot observar com les dos tensions es combinen. Depenent del signe de cadascuna d'elles, la seva combinació màxima serà en l'extrem superior o en el inferior de la peça respecte l'eix  $z$ ; en el cas de la Figura 38, les dues són negatives i el seu màxim és en l'extrem de sota de la peça. Aquesta combinació de tensions normals tindrà per fórmula:

$$\sigma_x = \frac{M_z \cdot h}{I_z \cdot 2} + \frac{N_x}{A}$$

Sent

$M_z \rightarrow$  Moment flector respecte l'eix z

$I_z \rightarrow$  Inèrcia respecte l'eix z

$A \rightarrow$  Àrea de la secció

$h \rightarrow$  altura total de la secció

$N_x \rightarrow$  força normal de la secció en la direcció de la barra (x)

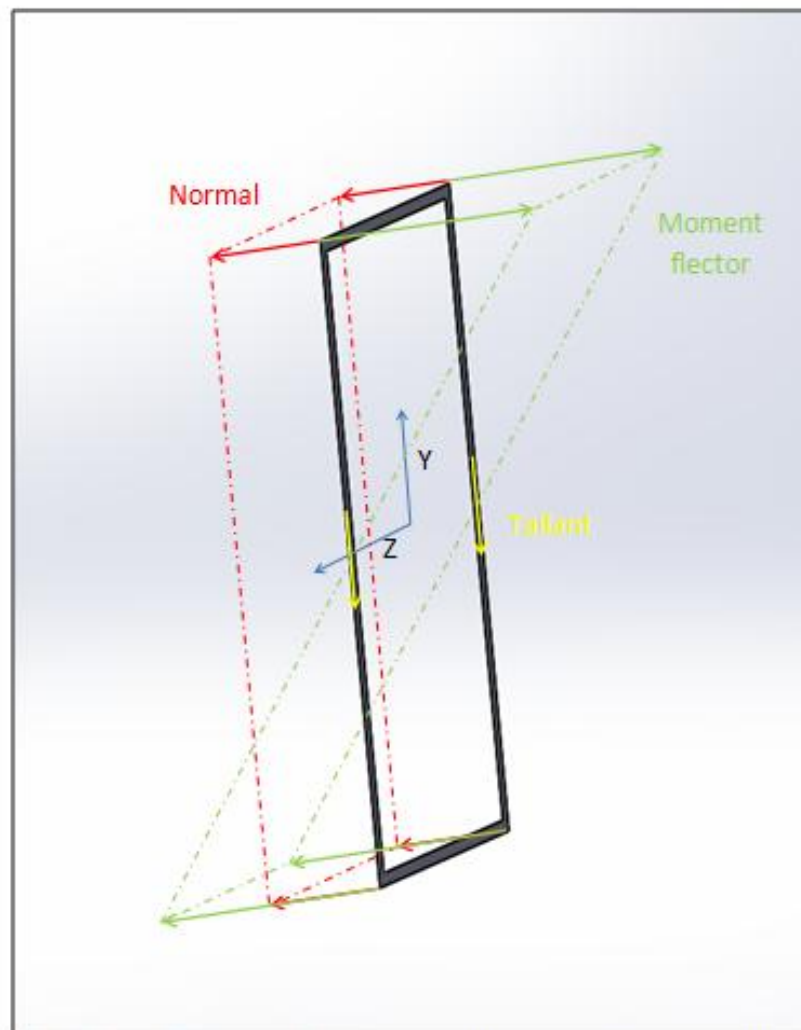


Figura 38: Repartiment d'esforços (tots negatius) en la secció

En aquest sistema de barres no existirà el moment torçor, o almenys serà menyspreable. Això és degut a que les forces presents en el sistema tindran la mateixa incidència per un costat que per l'altre de la barra. Per aquesta raó és per la que tenim un parell d'actuadors per a realitzar el moviment  $\alpha$ , cada un ancorat a cantó i cantó de la barra com es pot observar en la Figura 15. Com que aquest parell d'actuadors durà a terme les mateixes forces a banda i banda de la secció, s'evitarà que aparegui el moment torçor.

Aquestes tres forces/moments ( $N_x$ ,  $T_y$  i  $M_z$ ) triats per a fer la imatge següent són tots de signe negatiu com en el cas de la primera secció crítica a analitzar (subratllada en verd en els càlculs de la barra superior segon sement).

**Tubos de acero**  
**Sección**  
**Rectangular**  
**IRAM-IAS**  
**U 500-218**  
**U 500-2592**

**B** = Ancho exterior  
**t** = Espesor de pared  
**R** = Radio de esquina exterior = 2,00 t  
**p** = Área exterior por metro lineal  
**A** = Sección bruta  
**g** = Peso por metro lineal  
**I** = Momento de Inercia  
**S** = Módulo elástico resistente  
**r** = Radio de giro  
**Z** = Módulo plástico  
**J** = Módulo de Torsión  
**C** = Constante torsional

B	H	t	p	Ag	g	Ix	Sx	rx	Zx	Iy	Sy	ry	Zy	J	C
[mm]	[mm]	[mm]	[m <sup>2</sup> /m]	[cm <sup>2</sup> ]	[Kg/m]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>3</sup> ]	[cm]	[cm <sup>3</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>3</sup> ]	[cm]	[cm <sup>3</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>3</sup> ]
100	140	3.20	0.469	14.687	11.529	413.74	59.11	5.31	70.51	247.14	49.43	4.10	56.09	479.00	84.62
		4.00	0.466	18.148	14.246	503.29	71.90	5.27	86.41	299.93	59.99	4.07	68.67	585.01	104.20
		4.75	0.464	21.316	16.733	582.44	83.21	5.23	100.70	346.33	69.27	4.03	79.97	679.38	121.97
		6.35	0.458	27.829	21.846	736.24	105.18	5.14	129.24	435.74	87.15	3.96	102.45	864.44	157.97
100	180	3.20	0.549	17.247	13.539	757.75	84.19	6.63	102.44	307.11	61.42	4.22	68.48	683.56	109.40
		4.00	0.546	21.348	16.758	925.48	102.83	6.58	125.90	373.65	74.73	4.18	84.03	836.56	134.92
		4.75	0.544	25.116	19.716	1075.15	119.46	6.54	147.13	432.52	86.50	4.15	98.06	973.49	158.17
		6.35	0.538	32.909	25.833	1370.53	152.28	6.45	189.97	547.13	109.43	4.08	126.24	1244.51	205.54
100	200	4.00	0.586	22.948	18.014	1198.99	119.90	7.23	148.05	410.52	82.10	4.23	91.71	966.79	150.28
		5.00	0.583	28.356	22.260	1458.26	145.83	7.17	181.40	496.53	99.31	4.18	112.12	1177.20	184.77
		6.00	0.579	33.633	26.402	1702.05	170.21	7.11	213.31	576.32	115.26	4.14	131.56	1375.08	218.00
		8.00	0.573	43.792	34.377	2144.60	214.46	7.00	272.92	718.11	143.62	4.05	167.57	1733.32	280.65
		10.00	0.566	53.425	41.938	2529.41	252.94	6.88	326.99	837.54	167.51	3.96	199.89	2041.71	338.14
100	250	5.00	0.683	33.356	26.185	2552.06	204.17	8.75	258.54	609.34	121.87	4.27	135.87	1586.70	232.27
		6.00	0.679	39.633	31.112	2990.14	239.21	8.69	304.89	708.86	141.77	4.23	159.76	1856.36	274.40
		8.00	0.673	51.792	40.657	3797.45	303.80	8.56	392.39	887.39	177.48	4.14	204.37	2348.24	354.25
		10.00	0.666	63.425	49.788	4515.84	361.27	8.44	473.04	1040.04	208.01	4.05	244.89	2777.28	428.14
		12.00	0.659	74.532	58.507	5148.71	411.90	8.31	546.98	1168.54	233.71	3.96	281.45	3144.11	495.98

Figura 39: Taules per a un perfil rectangular normativa CIRSOC

En la següent Figura 39<sup>24</sup> es representa la secció rectangular. Es partirà d'una secció de base igual a 100 mm, altura 200 mm i espessor 4 mm. S'ha de tenir en compte que la base estarà en la direcció x de la secció i l'altura en la direcció y de la mateixa; és a dir, respecte a la imatge anterior es canviarà l'eix Z per l'eix X.

Per tant, per aquest perfil triat amb les dimensions d'altura, base i espessor dites anteriorment, segons la normativa CIRSOC per a perfils estructurals rectangulars, tindrà les següents característiques:

$$I_z(I_x \text{ en la Figura 37}) = 1198,99 \text{ cm}^4$$

$$A(A_g \text{ en la Figura}) = 22,948 \text{ cm}^2$$

Mentre que el moment estàtic respecte l'eix z de la Figura 38 serà el següent:

$$y_G(\text{altura de l'eix d'inèrcia de mitja secció}) = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A_i}$$

$$= \frac{(100 \cdot 4) \cdot 98 + 2 \cdot (96 \cdot 4) \cdot 48}{100 \cdot 4 + 96 \cdot 4 \cdot 2} = 65,12 \text{ mm}$$

$$m_z = \frac{22,948 \cdot 10^2}{2} \cdot 65,12 = 74.718,688 \text{ mm}^3$$

Aquesta altura de l'eix d'inèrcia de mitja secció s'ha calculat tenint en compte que la secció acaba amb arestes vives i no està arrodonida, és a dir, com la de la Figura 38 no com la de la Figura 39. Aquesta simplificació s'ha realitzat per a facilitar els càlculs, degut a que no variarà massa el càlcul respecte al de la secció arrodonida. Un cop s'han trobat totes les dades necessàries per al càlcul de les tensions tallants i normals, s'anirà provant quina és la secció que és més crítica de les tres triades:

---

<sup>24</sup> Normativa CIRSOC. *Taules de perfils laminats i tubs estructurals*. Veure especificacions dels tubs de secció rectangular en l'enllaç [<http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/tablas.pdf>] Data de consulta [02/08/2016]. <sup>[11]</sup>

1. Secció B per l'esquerra de la **barra superior segon segment** (pintada en verd en els càlculs).

$$N_x = -38.295,38 \text{ N}$$

$$T_y = -69.090,51 \text{ N}$$

$$M_z = -20.727,15 \text{ Nm}$$

En l'anàlisi d'aquestes tensions s'haurà de diferenciar els dos casos on es troben les tensions màximes:

- Eix Z de la Figura 38. És el centre de la secció crítica i en ell trobem l'esforç tallant màxim degut a la  $T_y$  i l'esforç normal degut a la  $N_x$ , mentre que el moment flector al ser el centre de la peça és igual a 0. Per tant si es calculen per separat quedarà un esforç tallant màxim de:

$$\tau_{xy} = \frac{T_y \cdot m_z}{e \cdot I_z} = \frac{69090,51 \cdot 74718,688}{4 \cdot 1198,99 \cdot 10^4} = 107,64 \text{ MPa}$$

I un esforç normal sense tenir en compte el moment flector de:

$$\sigma_x = \frac{N_x}{A} = \frac{38.295,38}{22,948 \cdot 10^2} = 16,68 \text{ MPa}$$

Un cop trobades les dues tensions s'aplicarà el criteri de Von Mises que ens diu:

$$\sigma_{eqVON MISES} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2}$$



$$\sigma_{eqVON MISES} = \sqrt{16,68^2 + 3 \cdot 107,64^2} = 187,18 MPa$$

Aquesta tensió màxima s'ha de comparar amb la sigma equivalent que se li imposa al material. Per a trobar aquesta tensió equivalent pel material s'ha considerat un coeficient de seguretat de 1,45. Amb aquest coeficient serà suficient per assegurar que la peça no superarà el seu límit de fluència:

$$\sigma_{admissible} = \frac{\sigma_e}{\gamma_{seguretat}} = \frac{350}{1,45} = 241,38 MPa$$

- Extrem de la secció (extrem Y negatiu de la Figura 38). En aquest punt, com es pot observar en la Figura 38, només es tindrà un esforç normal degut per la  $N_x$  i un esforç normal degut pel moment flector  $M_z$ , mentre que la tallant serà 0 en aquest punt. Per tant si calculem els dos esforços normals combinats en una flexió composta es tindrà que:

$$\sigma_x = \frac{M_z \cdot h}{I_z \cdot 2} + \frac{N_x}{A} = \frac{20727,15 \cdot 10^3 \cdot 200}{1198,99 \cdot 10^4 \cdot 2} + \frac{38.295,38}{22,948 \cdot 10^2} = 189,56 MPa$$

Per tant, la sigma equivalent de Von Mises serà:

$$\sigma_{eqVON MISES} = \sqrt{189,56^2 + 3 \cdot 0^2} = 189,56 MPa$$

Per tant, si la  $\sigma_{eqVON MISES_{màxima}} = 189,56 < \sigma_{admissible}$  no fallarà elàsticament aquesta secció.

2. Secció B per la dreta de la **barra superior segon segment** (pintada en vermell en els càlculs):

$$N_x = -116.323,71 \text{ N}$$

$$T_y = 6.260,57 \text{ N}$$

$$M_z = -20.727,15 \text{ Nm}$$

- Eix Z de la Figura 56, les tensions seran les següents degudes a ( $N_x$  i  $T_y$ ), per tant esforç normal i tallant màxima seran:

$$\sigma_x = \frac{116323,71}{22,948 \cdot 10^2} = 50,69 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = \frac{6260,57 \cdot 74718,688}{4 \cdot 1198,99 \cdot 10^4} = 9,75 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eqVON MISES} = \sqrt{50,69^2 + 3 \cdot 9,75^2} = 53,43 \text{ MPa}$$

- Extrem de la secció, les tensions són degudes a  $N_x$  i  $M_z$  (flexió composta):

$$\sigma_x = \frac{20727,15 \cdot 10^3 \cdot 200}{1198,99 \cdot 10^4 \cdot 2} + \frac{116323,71}{22,948 \cdot 10^2} = 223,56 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eqVON MISES} = \sqrt{223,56^2 + 3 \cdot 0^2} = 223,56 \text{ MPa}$$

La secció no fallarà ja que es compleix que  $\sigma_{eqVON MISES_{màxima}} = 223,56 < \sigma_{admissible}$ . Per tant en aquest estudi analític de les tensions màximes en la barra superior del segon segment, s'arriba a la conclusió que la tensió equivalent per Von Mises màxima a la que s'arriba és 223,56 MPa. Posteriorment en l'apartat de l'anàlisi amb elements finits es compararà que aquesta tensió màxima analítica amb l'obtinguda per elements finits.

3. Secció C per la dreta de la **barra inferior primer segment** (pintada en vermell en els càlculs).

$$N_x = 41.432,92 \text{ N}$$

$$T_y = 52.611,92 \text{ N}$$

$$M_z = -26.241,98 \text{ Nm}$$

- Eix Z de la Figura 56, les tensions seran les següents degudes a ( $N_x$  i  $T_y$ ), per tant esforç normal i tallant màxima seran:

$$\sigma_x = \frac{41432,92}{22,948 \cdot 10^2} = 18,06 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = \frac{52611,92 \cdot 74718,688}{4 \cdot 1198,99 \cdot 10^4} = 81,96 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eqVON MISES} = \sqrt{18,06^2 + 3 \cdot 81,96^2} = 143,1 \text{ MPa}$$

- Extrem de la secció, les tensions són degudes a  $N_x$  i  $M_z$  (flexió composta):

$$\sigma_x = \frac{26241,98 \cdot 10^3 \cdot 200}{1198,99 \cdot 10^4 \cdot 2} + \frac{41432,92}{22,948 \cdot 10^2} = 236,9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eqVON MISES} = \sqrt{236,9^2 + 3 \cdot 0^2} = \mathbf{236,9 \text{ MPa}}$$

La secció no fallarà perquè  $\sigma_{eqVON MISES} < \sigma_{admissible}$ . Aquesta secció C de 236,9 MPa serà la secció més crítica de les tres analitzades. Posteriorment es compararà aquesta tensió màxima analítica amb l'obtinguda per elements finits.

Un cop fet el dimensionament de la secció rectangular s'ha d'especificar quina serà l'empresa on s'adquirirà els tubs d'aquesta secció. Aquesta empresa serà el grup CONDESA<sup>25</sup>, on s'adquirirà els tubs rectangulars per a construir les quatre barres que conformen el braç articulat. Aquests tubs seran del acer estructural anomenat anteriorment de 350 MPa de límit elàstic, i acabats en fred.

### 8.3. Anàlisi estructural de les peces per elements finits.

#### 8.3.1. Consideracions.

En aquest apartat s'estudiarà els esforços i desplaçaments que sofreixen cadascuna de les peces dissenyades mitjançant el programa ANSYS d'elements finits. Per a fer l'estudi de cada peça s'ha contemplat les següents característiques:

- El material de conformació serà el AISI 1020. Aquest material té per nom comercial AISI 1020, amb un límit elàstic convencional de 350 MPa i un límit de ruptura de 420 MPa. Partint de la base que s'haurà d'evitar que cap peça entri en fluència s'ha decidit elegir un coeficient de seguretat d'1,45 per tant:

$$\sigma_{admissible} = \frac{\sigma_e}{\gamma_{seguretat}} = \frac{350}{1,45} = 241,4 \text{ MPa}$$

- Totes les peces se'ls hi realitzarà un mallat per a l'estudi de tensions i deformacions. Aquest serà amb elements tridimensionals, tetraedres específicament, amb una dimensió dels mateixos de 10 mm per a cada element. Com que les dimensions generals de la peça són molt elevades (com es podrà comprovar en els plànols de cada peça en els annexos) en relació a la mesura de cada element, aquest mallat serà suficient per a

---

<sup>25</sup> Empresa CONDESA. *Catàleg de tubs estructurals*. Veure especificacions del tub rectangular acabat en fred en l'enllaç [[http://www.condesa.com/pdf/es/TUBO\\_ESTRUCTURAL\\_CASTV3.pdf](http://www.condesa.com/pdf/es/TUBO_ESTRUCTURAL_CASTV3.pdf)] Data de consulta [05/08/2016].<sup>[12]</sup>

poder fer un estudi de tensions i deformacions de forma precisa. Consegüentment, no serà necessari refinar les peces, ja que els elements d'estudi són suficientment petits en tota la peça per a crear uns càlculs prou precisos. Per exemple, el mallat de l'articulació del telescòpic (mallat de 10 mm) es pot apreciar en la Figura 40.

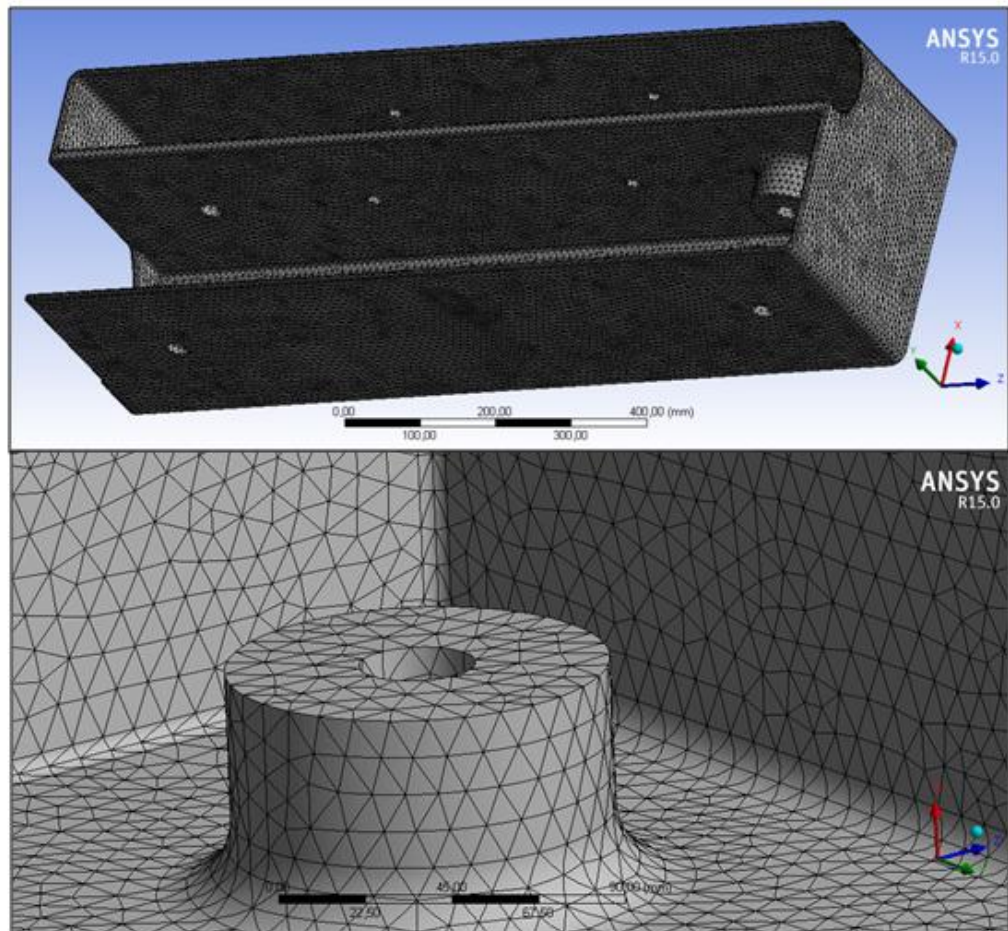


Figura 40: Mallat de 10 mm

- Per a l'aplicació de les condicions de contorn en cada peça es seguirà el següent criteri per a les superfícies que s'han de fixar en la peça i per a les superfícies que reben forces exteriors:
  - Superfícies fixades. Primer és necessari especificar tant les unions del braç amb articulació com els ancoratges de l'actuador seran tots birecolzats. Això significa que si es vol aplicar una condició de contorn en una unió o un ancoratge s'haurà d'aplicar tant a la superfície de contacte d'un extrem com la de l'altre extrem a causa del birecolzament. Aquesta característica permet donar-li a les unions molta més rigidesa per així evitar la seva possible fallida

elàstica. Per a establir el criteri de les superfícies fixades es recorrerà al diagrama del sòlid lliure de cada peça i es fixaran les superfícies de les resultants calculades en el diagrama de forces de cada peça.

- Forces aplicació. Per a definir quines seran les forces d'aplicació en cada peça es definiran també a partir del diagrama del sòlid lliure i seran les forces incidents en cada unió de la peça. Cada força incident, es descompondrà en la seva projecció vertical i horitzontal, després s'aplicarà de la següent forma en el programa ANSYS:
  - Forces verticals. La força s'aplicarà sol en una de les dues meitats de la superfície cilíndrica. Amb això simplifiquem el fet que la força que rep la unió amb passador és majoritàriament sobre una meitat de la superfície cilíndrica mentre que l'altra meitat no en rep tanta.
  - Forces horitzontals. En aquest cas la força o s'aplicarà en la meitat esquerra de la superfície cilíndrica o en la meitat dreta. Per a fer la tria se seguirà el mateix criteri triat per les forces verticals, és a dir, en la meitat horitzontal que primer incideixi la reacció horitzontal.

És imprescindible especificar que tant per les forces horitzontals com verticals a especificar en el ANSYS, s'ha de tenir en compte que la unió al estar birecolzada reparteix la força entre els dos suports. Conseqüentment, per a simplificar aquest fet amb l'anàlisi d'elements finits s'ha decidit aplicar la meitat de la força a cadascun dels dos extrems de la unió.

Pel que fa a l'eina, al braç telescòpic i a la base motoritzada no s'analitzaran en el programa d'elements finits, ja que: l'eina rep forces tan petites que no és necessari utilitzar el programa per assegurar que les tensions i deformacions no superin els límits admissibles mentre que el telescòpic i la base al ser simulacions que en realitat no s'utilitzaran, no és necessari analitzar-les perquè bàsicament no es construïran sinó que s'adquiriran a una empresa externa.

També és necessari especificar que en el cas que una peça rebi una força externa provinent d'un parell d'actuadors com és el cas per exemple de la unió C en l'articulació del paral·lelogram (diagrama present en la Figura 30), la força que s'aplicarà en les unions de l'articulació serà aquesta dividida per quatre, ja que tenim

dos actuadors que la provoquen i cadascun està birecolzat en l'articulació.

### 8.3.2. Anàlisi de tensions i deformacions en cada peça:

#### 1. Articulació del telescòpic.

En aquesta peça les superfícies fixades seran les de les unions B i D de la Figura 27 mentre que les forces aplicades seran les presents en les unions A i E de la Figura 27 (veure pàgina 63). Les següents imatges mostren l'anàlisi de tensions i deformacions de l'articulació telescòpica en el programa ANSYS.

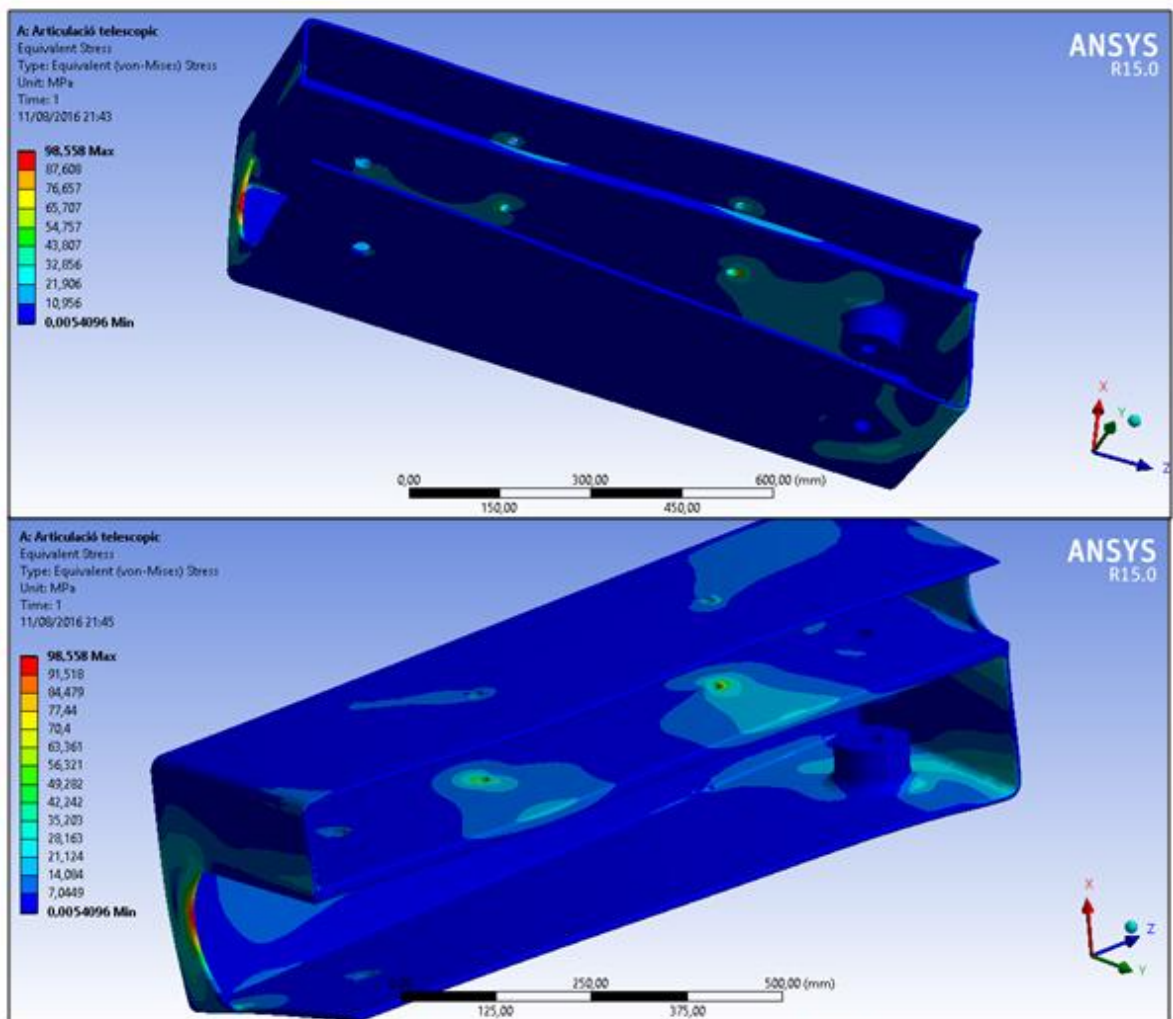


Figura 41: Distribució de tensions en l'articulació del telescòpic



Es pot observar que la tensió màxima és 98,5 MPa mentre que la deformació màxima és 0,8 mm. Aquesta peça per tant, no entrarà en fallida elàstica ja que s'allunya molt de la tensió màxima admissible calculada anteriorment ( $\sigma_{admissible} = 241,4 \text{ MPa}$ ). El desplaçament màxim també es pot assegurar que és molt petit en relació a les dimensions que té la peça i per tant tampoc ens suposarà un problema. Posteriorment s'especificaran les dimensions de la peça en els plànols.

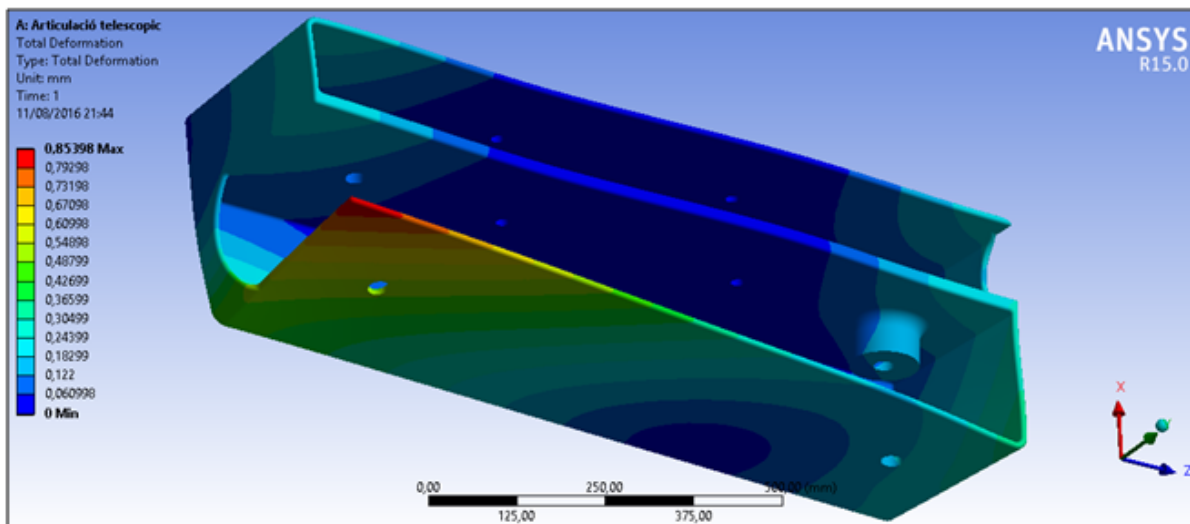


Figura 42: Distribució de deformacions

## 2. Braç superior segon segment.

En aquest braç s'han fixat les unions A i B de la Figura 28 mentre que la força externa que s'ha aplicat és la mateixa que la present en la unió C de la Figura 28 (veure pàgina 66). En la Figura 43 es pot observar on es troben les tensions màximes i quin valor tenen. Això ens permet assegurar que si el valor màxim de tensió és 192,4 MPa aquest no entrarà mai en fluència. Pel que fa a la Figura 44 s'aprecia les deformacions en la peça. La màxima deformació que s'observa és de 19,2 mm, per tant, es pot assegurar que aquesta serà molt petita en relació a la dimensió total de la peça que tindrà una llargada de 4 m. Al ser tant petita respecte a les dimensions generals de la peça provocarà que la possible problemàtica que pugui donar sigui insignificant. Aquesta tensió es comparable a la tensió analítica de 223,56 MPa calculada en la pàgina 90. Aquesta diferència entre la màxima analítica i la màxima calculada per elements finits es ocasionada perquè en el càlcul analític no s'ha tingut en compte l'augment de gruix del perfil rectangular al voltant de les unions. Aquest augment de gruix és de 6 mm i es pot observar en la Figura 43.

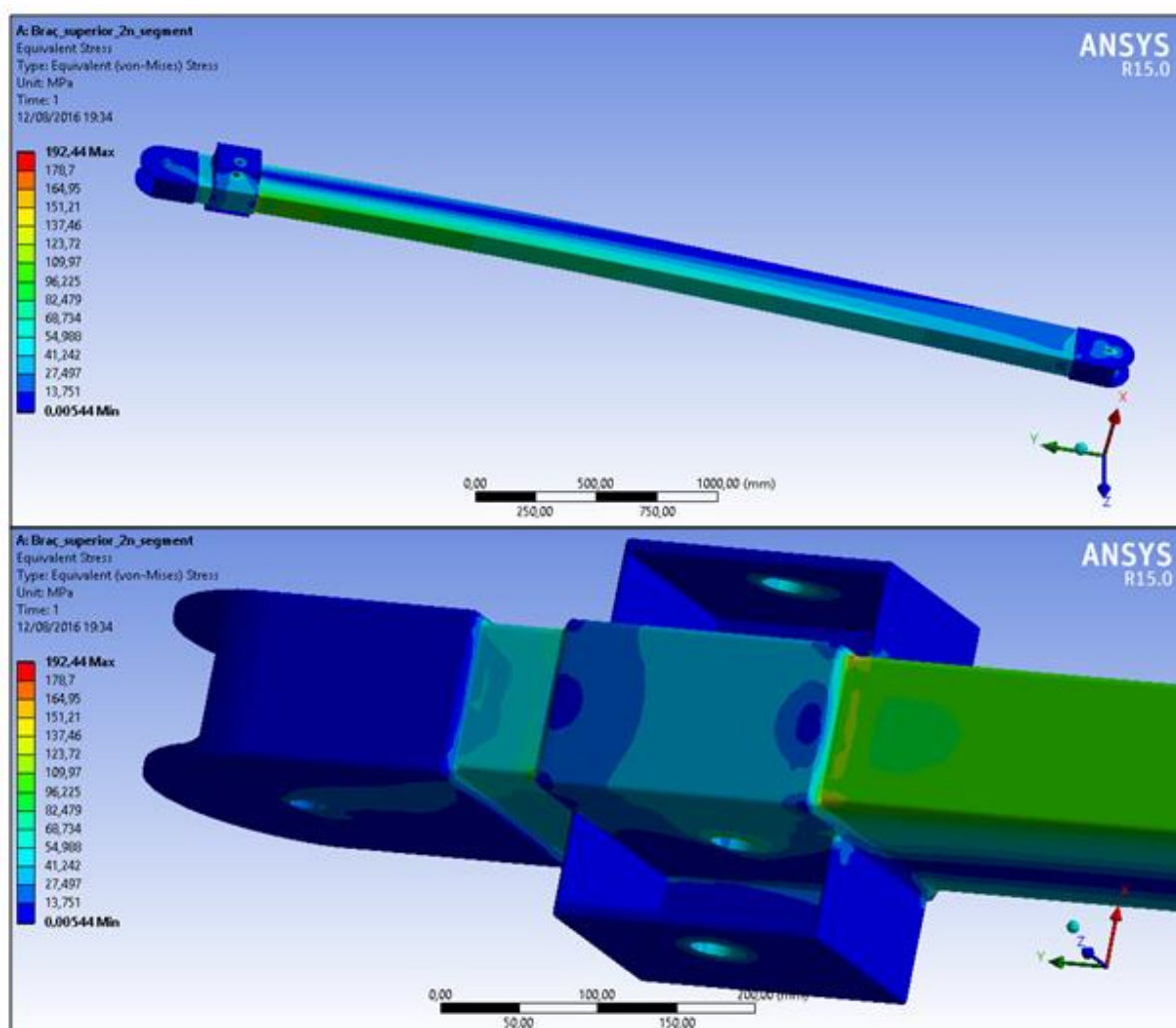


Figura 43: Distribució de tensions en el braç superior segon segment

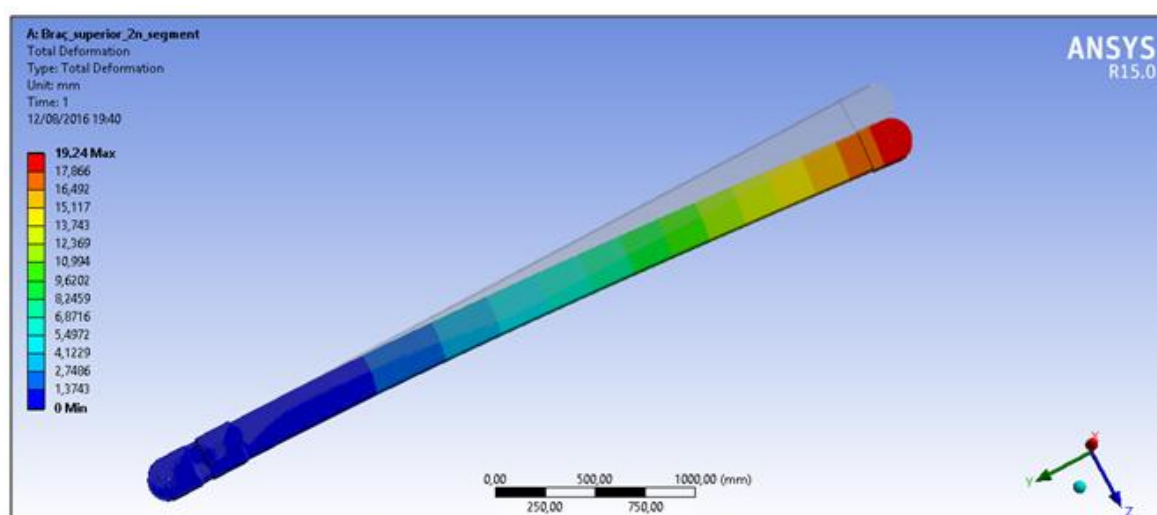


Figura 44: Deformacions en la peça

### 3. Braç inferior segon segment (braç de força axial treballant a tracció).

En aquest braç es fixarà un extrem mentre que l'altre se li aplicarà la força de tracció que per aquesta barra és de 108.229,7 N. En relació amb el braç anterior aquest braç de força axial sotmès a tracció pels seus extrems té unes tensions i deformacions menors. La tensió màxima és de 109,3 MPa i per tant no entrarà en fluència mentre que la deformació màxima és 0,5 mm, un valor tant baix que no suposarà una problemàtica per al sistema. La disminució d'aquests dos valors respecte el braç superior del segon segment és atès que el braç superior està sotmès a un moment flector, una força normal i una força tangencial mentre que el braç de força axial només a una força normal. Aquest disminució és deguda bàsicament a que el perfil rectangular treballa molt millor amb forces normals que amb moments flectors i forces tangencials. Pel que fa a l'anàlisi del braç de força

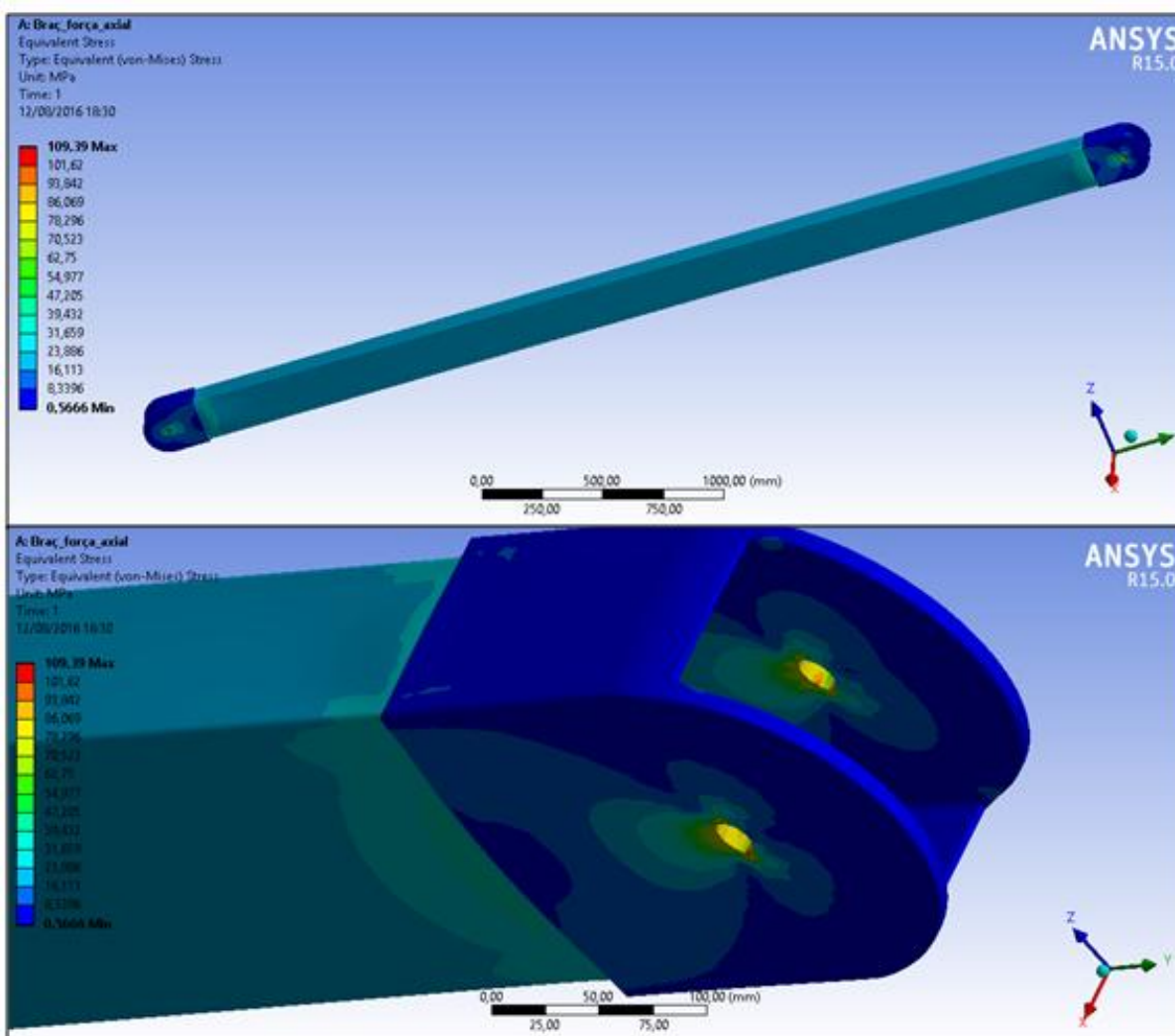


Figura 45: Tensions en el braç de força axial segon segment

axial del primer segment (braç superior) no es durà a terme, ja que si aquest que suporta una normal de tracció de 108.229,7 N i no falla elàsticament, no serà necessari analitzar l'altre braç de força axial perquè suporta una força de tracció molt més petita que l'anterior, de 5.757,8 N. Per tant, si aquest anàlisi no ha donat ninguna problemàtica un anàlisi d'una peça idèntica amb una força menor tampoc n'hi donarà.

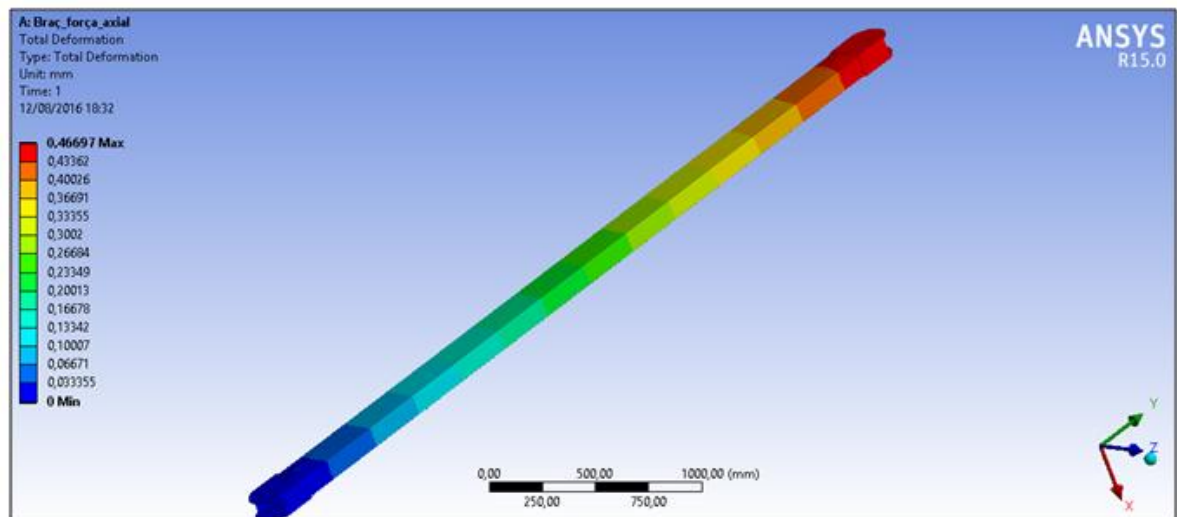


Figura 46: Deformacions en el braç de força axial

#### 4. Articulació del paral·lelogram.

En aquest anàlisi es fixarà les unions A i B de la Figura 30 mentre que s'aplicaran les forces de les unions C, D i E de la Figura 30 (veure pàgina 69). Pel que fa a les deformacions es pot observar que la màxima és 0,8 mm, una valor tant petit que no implicarà ninguna problemàtica. El programa d'elements finits exagera en abundància la deformació de la peça com es pot observar en totes les captures de ANSYS. Es pot assegurar que exagera les deformacions perquè per exemple, la distància de les dos platines de l'articulació és de 112 mm, i si la deformació màxima és de 0,8 mm mai podrien arribar a tocar-se aquestes dues. Pel que fa a la tensió té una màxima de 235 MPa, inferior a la màxima admissible i doncs, no fallarà elàsticament.

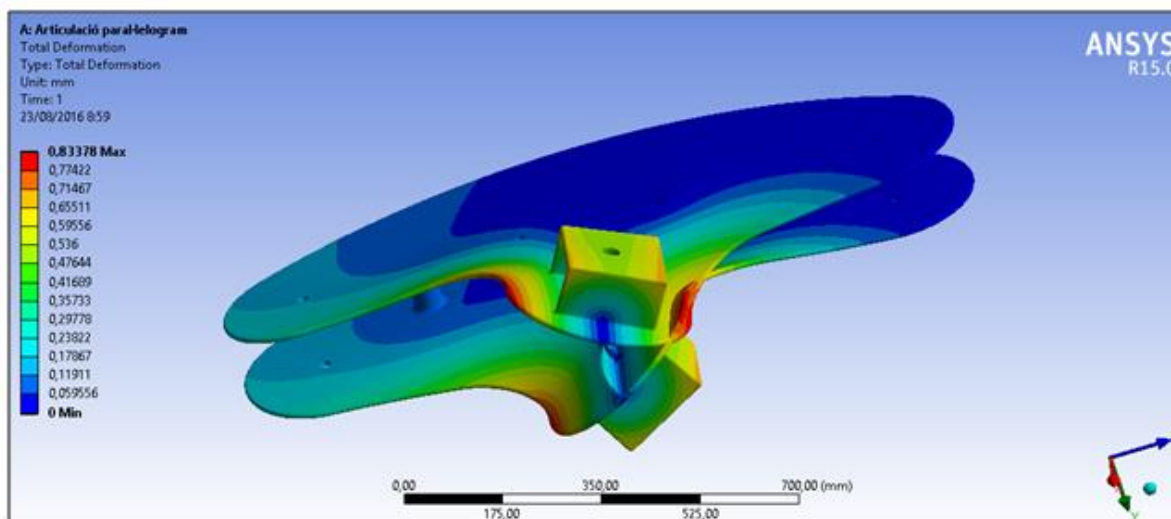


Figura 47: Deformacions de l'articulació

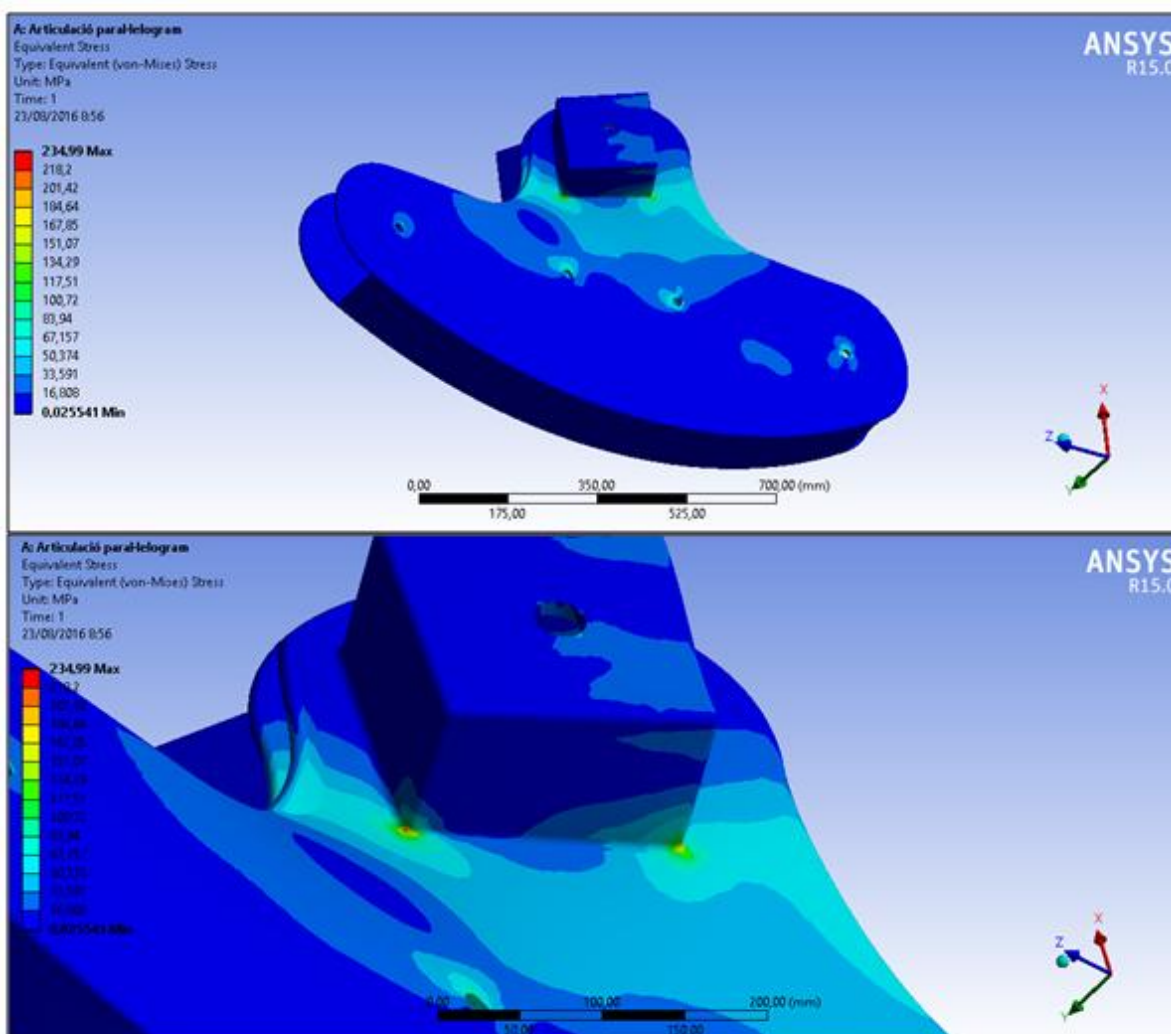


Figura 48: Distribució de tensions



## 5. Braç inferior primer segment.

En aquest braç s'ha fixat les unions A i B de la Figura 31 i s'ha aplicat la força de la unió C (veure pàgina 71). Com es pot observar en les imatges la tensió màxima és de 213,5 MPa mentre que la deformació màxima de 22,4 mm, uns valors una mica més elevats que en el braç superior del segon segment que té una geometria similar. Això és degut a que en aquest cas el braç rep una força tangencial i un moment flector al llarg del braç més gran que en el braç superior del segon segment. Pel que fa a la tensió no suposarà un problema ja que és més petita que la màxima admissible que és 241,4 MPa mentre que la deformació, tot i ser la més elevada que es trobarà en el conjunt de les peces analitzades, tampoc suposarà ningun problema ja que segueix sent petita comparada a la dimensió total del braç de llargada 4 m.

Aquesta tensió màxima de 213,5 MPa es pot comparar amb la màxima analítica de 236,9 MPa per al braç inferior primer segment calculada en la pàgina 91. Aquesta diferència d'uns 20 MPa és deguda a que en els càlculs analítics no s'ha considerat que en els punts d'ancoratge de cada braç s'ha realitzat un augment d'espessor de 6 mm (arribant a un espessor total de 10 mm) que relaxa les tensions sofrides en els punts d'ancoratge. Això més el fet que les tensions màximes calculades amb elements finits no estiguin en la mateixa secció transversal C de l'ancoratge (veure Figura 50) provoca aquesta diferència entre la tensió teòrica màxima i la tensió màxima trobada amb ANSYS.

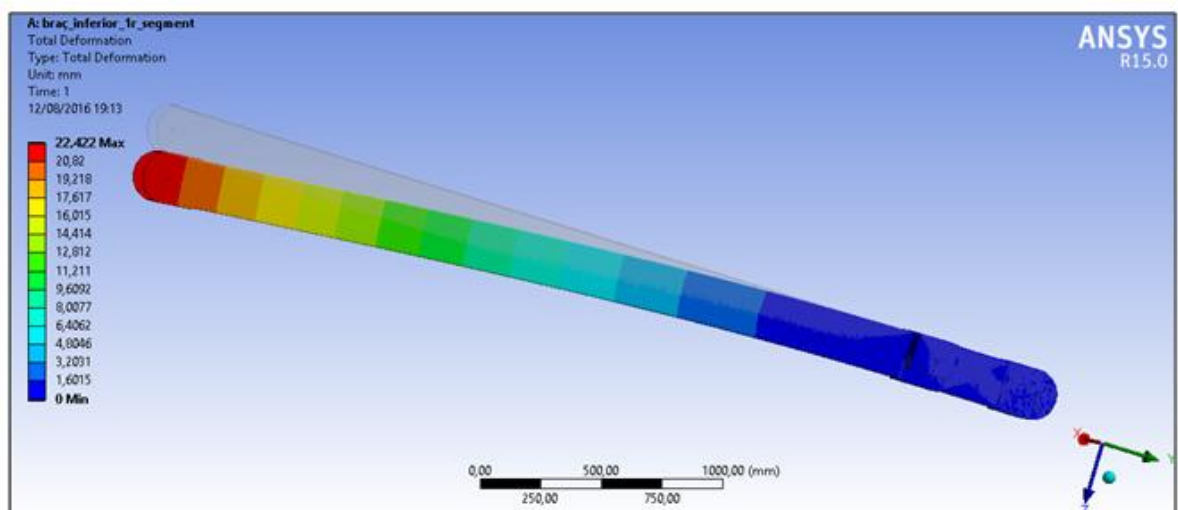


Figura 49: Deformacions en la peça

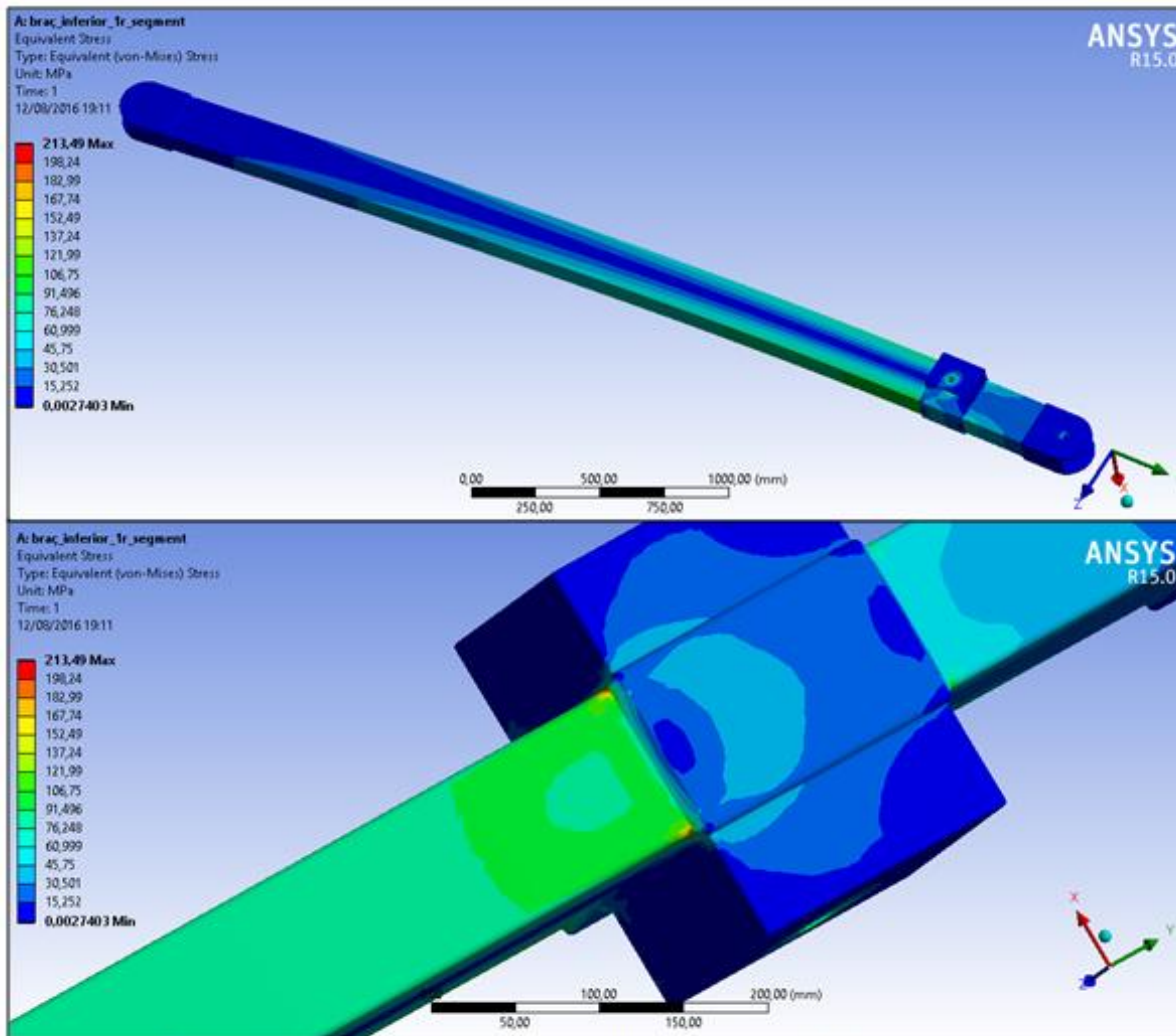


Figura 50: Distribució tensions braç inferior primer segment

## 6. Articulació fixa.

En aquest anàlisi s'ha fixat la superfície de sota de la peça i les forces aplicades són les mateixes que en les unions B, C i A de la Figura 33 (veure pàgina 74). Pel que fa al a tensió màxima és de 128,2 MP a com es pot apreciar en la Figura 51 mentre que la deformació màxima és de 0,5 mm com es pot observar en la Figura 52. Per tant, es pot assegurar que aquesta peça no sofrirà una fallada elàstica i no presentarà problemes per les seves deformacions ja que són molt reduïdes respecte a les dimensions totals de la peça.

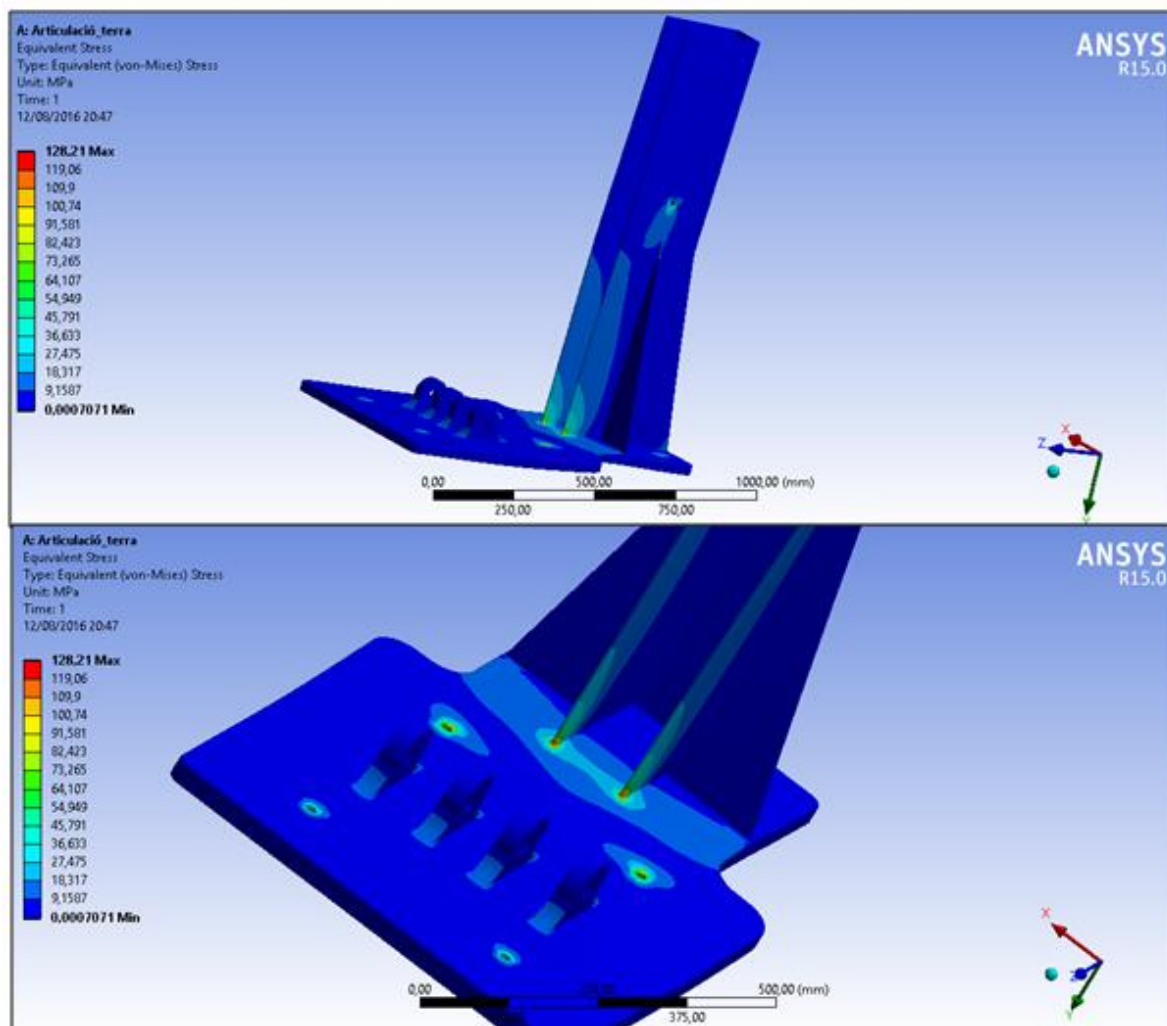


Figura 51: Distribució de tensions en l'articulació fixa

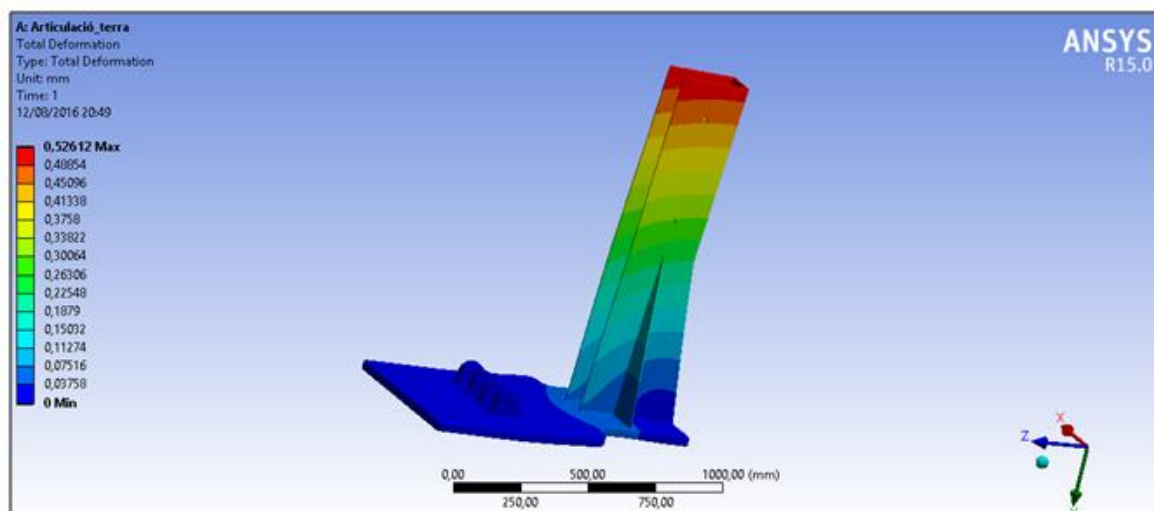


Figura 52: Deformacions peça



## 8.4. Especificacions per als actuadors.

La gama d'actuadors triats per al disseny són els presents en el catàleg de cilindres hidràulics d'STS<sup>26</sup> de doble efecte i s'adquiriran a la mateixa empresa per a dissenyar el braç. La següent imatge mostra les dimensions generalitzades i l'aspecte del tipus de cilindre utilitzat en cada cas.

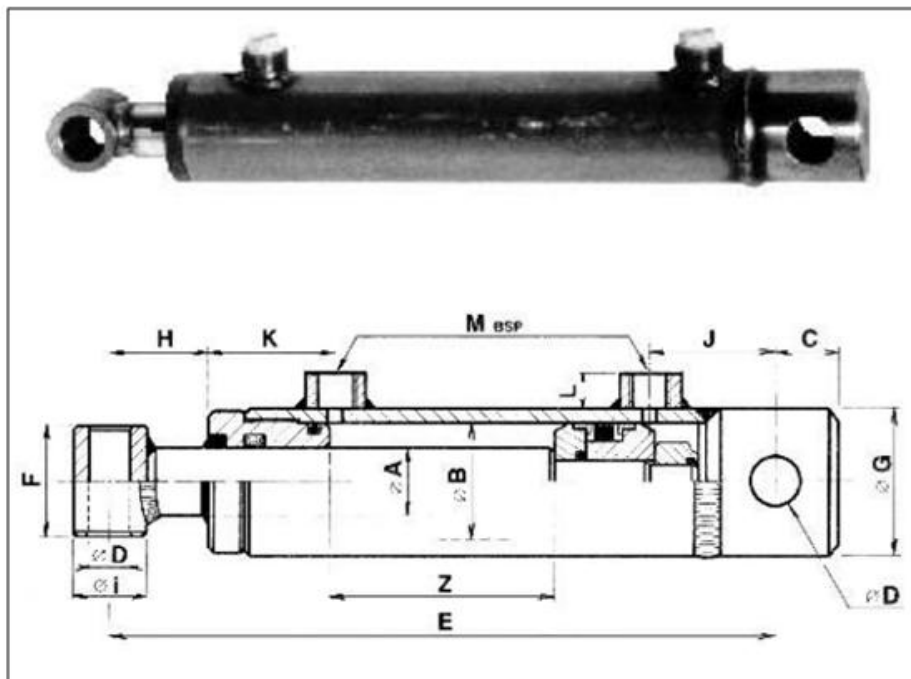


Figura 58: Dimensions generalitzades de cada cilindre

Per a decidir quin tipus d'actuador és adient en cada cas s'utilitzarà el gràfic que tenim a continuació; a partir de la força exercida pels actuadors calculada en els diagrames del sòlid lliure s'elegirà un o altre segons quina sigui la seva força d'empenta màxima.

<sup>26</sup> Empresa Suministros Tecnicos del Sur (STS) S.A. *Catàleg de cilindres hidràulics*. Veure especificacions dels actuadors de doble efecte en l'enllaç  
[\[http://www.sts.es/archivos/PRODUCTOS/CATALOGO/CILINDROS%20HIDRAULICOS.pdf\]](http://www.sts.es/archivos/PRODUCTOS/CATALOGO/CILINDROS%20HIDRAULICOS.pdf) Data de consulta [06/08/2016].<sup>[13]</sup>

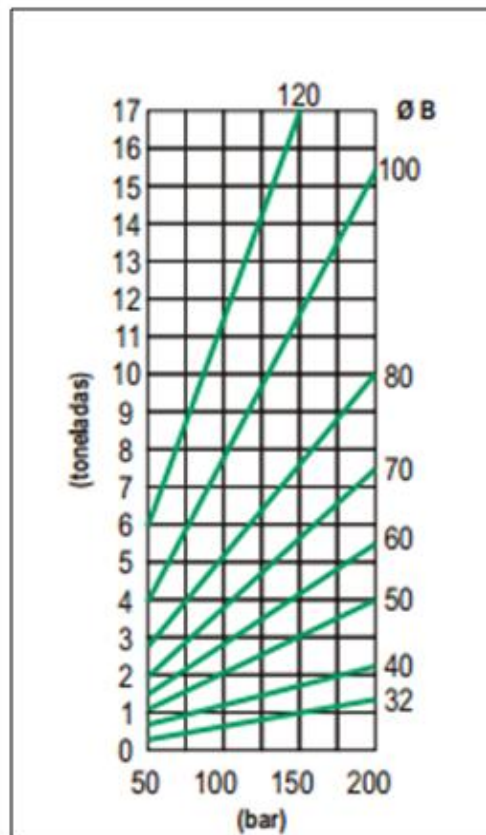


Figura 59: Força d'empenta

En aquest gràfic (Figura 59) es pot observar com varia la força d'empenta en funció de la pressió exercida pel cilindre i en funció del diàmetre de la cavitat interior ( $\varnothing B$ ). Com es pot comprovar en els càlculs el cilindre que exerceix més pressió són el parell de cilindres hidràulics presents en l'articulació del paral·lelogram i que permeten la rotació  $\beta$ . Cada cilindre tindrà de fer una força d'empenta, doncs, de 54.236,07 N; de 5,5 tones. Si es mira el gràfic, el pes anterior és la força d'empenta a màxima pressió que pot donar els cilindres amb 60 mm de diàmetre interior. Conseqüentment, s'ha decidit triar que tots els cilindres del braç articulat seran de 70 mm de diàmetre intern per a que així no treballin sempre a màxima pressió. Aquests cilindres els trobarem en la següent Figura 60, on es podrà observar les dimensions de cada un. Tots aquests cilindres tenen la similitud que tenen el mateix diàmetre d'unió en els extrems cada un que és 30,5 mm. L'únic que diferenciarà un de l'altre seran les seves dimensions en la posició de màxima i mínima distància entre els eixos dels extrems i el seu pes. D'aquesta forma s'ha elegit que els cilindres es reparteixin de la següent forma:

- Parell de cilindres en l'articulació fixa. Aquests actuadors són el número 3 de la Figura 15. El tipus d'actuador serà el CICFAED amb referència 704/5, les mesures i pes dels quals es poden observar en la Figura 60 (enquadrades en vermell).
- Parell de cilindres de l'articulació del paral·lelogram. Aquests són el número 4 representats en la Figura 15. L'especificació de cadascun serà la que trobem en la Figura 60 per al actuador CICFAEB referència 704/3 (enquadrada en blau).

CODIGO	P.V.P. (€)	REF.	ØA mm	ØB mm	Z (carrera) mm	E mm	C mm	D mm	F mm	G mm	H mm	I mm	J mm	K mm	L mm	M mm	Vol. litros	Peso kg
CICFAE1		704/1			100	310	25	30.5	55	80	39	50	58	65	15	3/8	0.85	11
CICFAEA		704/2			200	410	25	30.5	55	80	39	50	58	65	15	3/8	0.85	11
CICFAEB		704/3			300	510	25	30.5	55	80	39	50	58	65	15	3/8	1.20	13
CICFAEC		704/4			400	610	25	30.5	55	80	39	50	58	65	15	3/8	1.60	15
CICFAED		704/5			500	710	25	30.5	55	80	39	50	58	65	15	3/8	2.00	17
CICFAEE		704/6			600	810	25	30.5	55	80	39	50	58	65	15	3/8	2.35	19
CICFAEF		704/7	40	70	700	910	25	30.5	55	80	39	50	58	65	15	3/8	2.75	21
CICFAEG		704/8			800	1010	25	30.5	55	80	39	50	58	65	15	3/8	3.55	25
CICFAEH		704/9			900	1110	25	30.5	55	80	39	50	58	65	15	3/8	3.95	27
CICFAEI		704/10			1000	1210	25	30.5	55	80	39	50	58	65	15	3/8	4.35	29
CICFAEJ		704/11			1100	1310	25	30.5	55	80	39	50	58	65	15	3/8	4.75	31
CICFAEK		704/12			1200	1410	25	30.5	55	80	39	50	58	65	15	3/8	5.00	33
CICFAEL		704/13			1300	1510	25	30.5	55	80	39	50	58	65	15	3/8	5.40	35

Figura 60: Taula de característiques dels actuadors

- Cilindre de l'articulació del telescòpic. Aquest és l'actuador número 5 en la Figura 14. Vindrà especificat per l'actuador CICFAEH referència 704/9 de la següent imatge (les dimensions del qual estan enquadrades en verd).

CODIGO	P.V.P. (€)	REF.	ØA mm	ØB mm	Z (carrera) mm	E mm	C mm	D mm	F mm	G mm	H mm	I mm	J mm	K mm	L mm	M mm	Vol. litros	Peso kg
CICFAAA		700/05			50	205	17	16	35	40	28	30	33	35	12	1/4	0.05	1.9
CICFAAB		700/10			100	255	17	16	35	40	28	30	33	35	12	1/4	0.11	2.2
CICFAAC		700/15			150	305	17	16	35	40	28	30	33	35	12	1/4	0.16	2.6
CICFAAD		700/20	20	32	200	355	17	16	35	40	28	30	33	35	12	1/4	0.21	2.9
CICFAAE		700/30			300	455	17	16	35	40	28	30	33	35	12	1/4	0.26	3.6
CICFAAI		700/70			700	855	17	16	35	40	28	30	33	35	12	1/4	0.31	3.9
CICFAAL		700/1000			1000	1155	17	16	35	40	28	30	33	35	12	1/4	0.36	4.2
CICFABA		701/1			100	270	19	20.5	40	50	50	35	45	42	15	3/8	0.15	3.7
CICFABB		701/2			200	370	19	20.5	40	50	50	35	45	42	15	3/8	0.25	4.5
CICFABC		701/3			300	470	19	20.5	40	50	50	35	45	42	15	3/8	0.40	5.5
CICFABD		701/4			400	570	19	20.5	40	50	50	35	45	42	15	3/8	0.50	6.5
CICFABE		701/5			500	670	19	20.5	40	50	50	35	45	42	15	3/8	0.65	7.5
CICFABF		701/6			600	770	19	20.5	40	50	50	35	45	42	15	3/8	0.75	8.5
CICFABG		701/7	25	40	700	870	19	20.5	40	50	50	35	45	42	15	3/8	0.85	9.5
CICFABH		701/8			800	970	19	20.5	40	50	50	35	45	42	15	3/8	0.95	10.5
CICFABI		701/9			900	1070	19	20.5	40	50	50	35	45	42	15	3/8	1.05	11.5
CICFABJ		701/10			1000	1170	19	20.5	40	50	50	35	45	42	15	3/8	1.15	12.5
CICFABK		701/11			1100	1270	19	20.5	40	50	50	35	45	42	15	3/8	1.25	13.5
CICFABL		701/12			1200	1370	19	20.5	40	50	50	35	45	42	15	3/8	1.40	14.5

Figura 61: Taula d'especificacions per als actuadors

Pel que fa a l'actuador present en l'eina que permet la rotació  $\gamma$ , degut a que la força que ha de suportar aquest actuador és molt petita en comparació a la dels actuadors anteriors, es triarà d'unes dimensions menors. La força d'empenta màxima d'aquest actuador serà de 2 tones, mentre que el pes de l'eina és d'uns 80 kg aproximadament; per tant, aquest actuador de diàmetre interior de la cabina de 40 mm (veure gràfic de la Figura 59) serà suficient per aguantar el pes de l'eina i poder-la rotar. Aquest actuador serà específicament el CICFABC amb referència 701/3, en la Figura 61 es pot observar les seves dimensions i el seu pes (enquadrades en vermell).

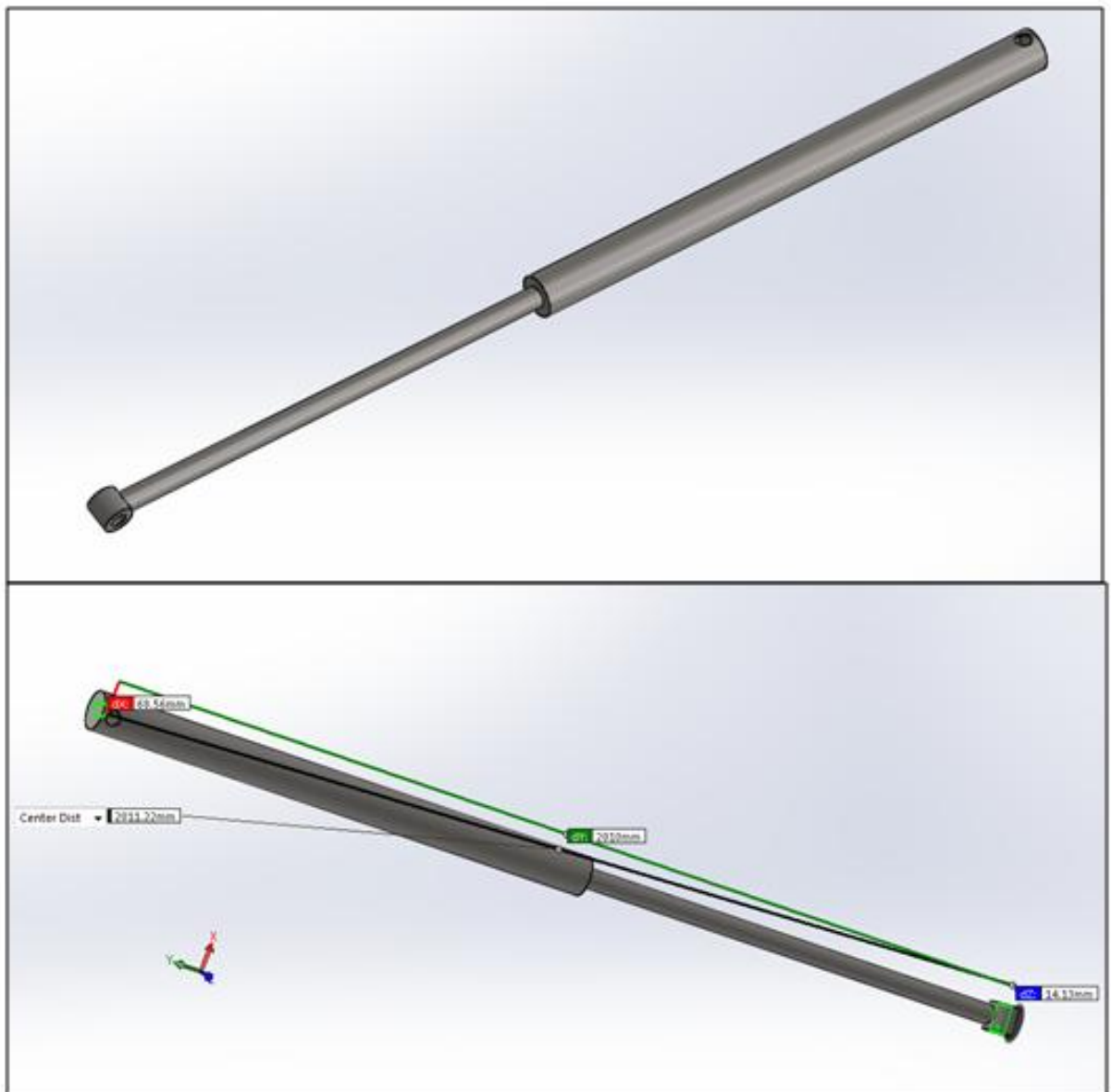


Figura 62: Actuador de l'articulació del telescòpic

Respecte a com s'han simulat aquests cilindres en el model CAD, simplement comentar que s'ha creat una carcassa per al pistó i per a la camisa de fora (sense entrar en detall en tot el circuit que tenen intern per al pas de l'oli hidràulic) per a que simuli unes mateixes dimensions i un mateix pes que els reals elegits anteriorment. En la Figura 62 es pot apreciar la simulació del cilindre hidràulic present en l'articulació del telescòpic en el seu estat de màxim allargament. Es pot observar que la distància normal entre extrems quan està allargat totalment és de 2010 mm, al igual que l'actuador CICFAEH anteriorment descrit. El pes del model CAD és d'uns 30 kg mentre que el de l'actuador real és de 27 kg, d'aquesta forma es sobredimensiona el pes del disseny en CAD final.

## 8.5. Dimensionament de les unions.

En aquest apartat s'estudiarà com hauran de ser i quines mesures tindran les unions de les barres amb les seves articulacions respectives com dels ancoratges dels cilindres hidràulics. Al igual que en l'apartat anterior, es buscarà quina és la unió més crítica en tot el sistema del braç robòtic i es dimensionarà quin diàmetre haurà de tenir el passador com de les platines que l'aguanten fixe. Aquesta unió és la present entre el braç superior segon segment i l'articulació del telescòpic. Si es troba la força total tangencial a la unió a partir de les dues forces  $R_x$  i  $R_y$  calculades en

l'articulació del telescòpic  $T = \sqrt{R_y^2 + R_x^2} = 115.984 \text{ N} \approx 120 \text{ kN}$ . Un cop es coneix

la força total tangencial que suportarà la unió més crítica, es imprescindible especificar quin material serà el que s'utilitzarà tant per a la construcció del passador com per a la de les platines que l'aguanten. Per a les platines tant de les barres com de les articulacions s'utilitzarà el material especificat anteriorment, AISI 1020 que té una  $\sigma_{admissible_{platina}} = 280 \text{ MPa}$ . El material del passador serà el "AISI C1045"<sup>27</sup>, molt utilitzat com es pot veure en l'enllaç que es té a sota per a fabricar passadors o reblons. Aquest material té les següents propietats que es pot observar en la imatge següent:

---

<sup>27</sup> Empresa Interlloy. *Material AISI C1045*. Propietats del material definides en l'enllaç [<http://www.interlloy.com.au/our-products/carbon-steels/1045-medium-tensile-carbon-steel-bar/>] Data de consulta [08/08/2016].<sup>[14]</sup>

Typical Mechanical Properties - Hot Rolled Condition		
Tensile Strength Mpa	570 - 700	
Yield Strength Mpa	300 - 450	
Elongation in 50mm %	14 - 30	
Hardness Brinell HB	170 - 210	
Typical Mechanical Properties - Normalised Condition		
Tensile Strength Mpa	640	
Yield Strength Mpa		410
Elongation in 50mm %		22
Impact Izod J		54
Hardness	HB	187
	Rc	10

\*Material stocked generally in the hot rolled condition but can occasionally be in the normalised condition.NB. Check the mill certificate if critical for end use.

Figura 63: Taula de propietats per al acer AISI C1045

Es prendrà de la següent taula les propietats normalitzades del material, és a dir:

$\sigma_{\text{elàstica}}=410 \text{ MPa}$
$\sigma_{\text{rotura}}=640 \text{ MPa}$
Duresa=187 HB

$$\sigma_{\text{admissible}_{\text{rebló}}} = \frac{\sigma_e}{\gamma_{\text{seguretat}}} = \frac{410}{1,5} = 273,3 \text{ MPa}$$

Definits quines són les sigmes admissibles per a cada material (el de les platines i el del rebló), es mostrarà una imatge sobre com serà la unió d'aquest rebló amb les platines. La següent Figura 64 s'observa la unió entre l'articulació fixa i el braç superior primer segment. Per a fer els càlculs es necessari saber que la d=diàmetre del passador i la e=espesor de cadascuna de les platines. Els càlculs es dividiran en quatre parts (totes les fórmules representades tenen com a referència el formulari de Resistència de Materials ETSEIB<sup>28</sup>):

<sup>28</sup> UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. Departament de Resistència de Materials (ETSEIB). Formulari de l'assignatura Resistència de Materials. <sup>[10]</sup>



## 1. Cisallament:

$$\tau = \frac{T}{2 \cdot A_1} \leq \tau_{adm_{rebló}} = \beta \cdot \sigma_{adm_{rebló}}$$

El fet de tenir el dos multiplicant a l'àrea de cisallament és degut a que existeixen dues àrees per les quals el passador podria fallar, la de que està en contacte amb les platines de l'esquerra i la que està amb contacte amb les platines de la dreta; com bé es pot comprovar en la Figura 64. Si la  $\beta=0,8$  en el cas de reblons i  $A=\pi \cdot r^2$ , la següent fórmula aïllant el diàmetre del passador quedarà igual a:

$$d \geq \sqrt{\frac{2T}{\pi 0,8 \sigma_{adm_{rebló}}}} = 18,7 \text{ mm}$$

Per tant, partint d'aquest resultat es triarà de moment que el diàmetre mínim del rebló sigui de 20 mm per totes les unions presents en el braç robòtic. El fet d'utilitzar aquesta secció crítica per a fer el dimensionament i després tenir-lo en compte a totes les unions restants s'assegura que no falli ninguna d'aquestes per cisallament ja que es sobredimensiona el diàmetre dels passadors que es necessitaria per a cada una.

## 2. Aixafament:

$$\sigma' = \frac{T}{2 \cdot A_2} \leq \sigma_{adm_{platina}} = \alpha \cdot \sigma_{adm_{platina}}$$

En aquest cas el dos significa que la possibilitat d'aixafament de platines es té que repartir entre les dues platines que es té a banda i banda de la unió com es pot observar en la Figura 64. La  $\alpha=2,5$  ja que l'element d'unió és un rebló i la  $A_2=d \cdot e$ . Per tant, si aïllem el diàmetre del passador de la fórmula i considerem que l'espessor és el triat per a la barra de 4 mm queda:

$$d \geq \frac{T}{2 \cdot e \cdot 2,5 \cdot \sigma_{adm_{platina}}} = 21,42 \text{ mm}$$

El fet de que en aquest cas el diàmetre sigui superior al triat anteriorment de 20 mm provoca que s'hagi decidit augmentar l'espessor fins a un total de 10 mm tant en una platina (la provinent de la barra) com la de l'altra (provinent de l'articulació). Per tant, els nous càlculs amb l'augment d'espessor quedaran:

$$d \geq \frac{T}{2 \cdot e \cdot 2,5 \cdot \sigma_{adm_{platina}}} = 8,57 \text{ mm}$$

Ara sí, que mitjançant el rebló de 20 mm de diàmetre serà suficient per a dimensionar totes les unions del braç robòtic. Per tant, totes les unions presents estaran formades per passadors de 20 mm o de dimensions majors. El fet que puguin ser de dimensions majors es deu a que els ancoratges dels actuadors triats anteriorment per al braç articulat necessiten un passador de 30 mm per a poder-se mecanitzar. Pel que fa als ancoratges del cilindre hidràulic de l'eina aquests necessitaran un rebló de 20 mm per a ser mecanitzat. Totes aquestes mesures dels reblons per a mecanitzar els actuadors, són conseqüència dels diàmetres especificats en cada un dels dos extrems del actuador.

Aquests diàmetres per als actuadors del braç articulat (actuadors que permeten una força d'empenta màxima de 5,5 tones) és de 30,5 mm; per tant és necessari un rebló de 30 mm per a mecanitzar-los. Pel que fa al actuador de l'eina que permet una empenta màxima de 2 tones, els diàmetres en cada extrem del mateix són de 20,5 mm; per tant, es mecanitzarà amb un passador de 20 mm. Pel que fa a la unió del braç telescòpic simulat en el model CAD amb l'articulació del mateix es mecanitzarà amb un rebló de 30 mm. La resta d'unions es mecanitzaran amb reblons de 20 mm.



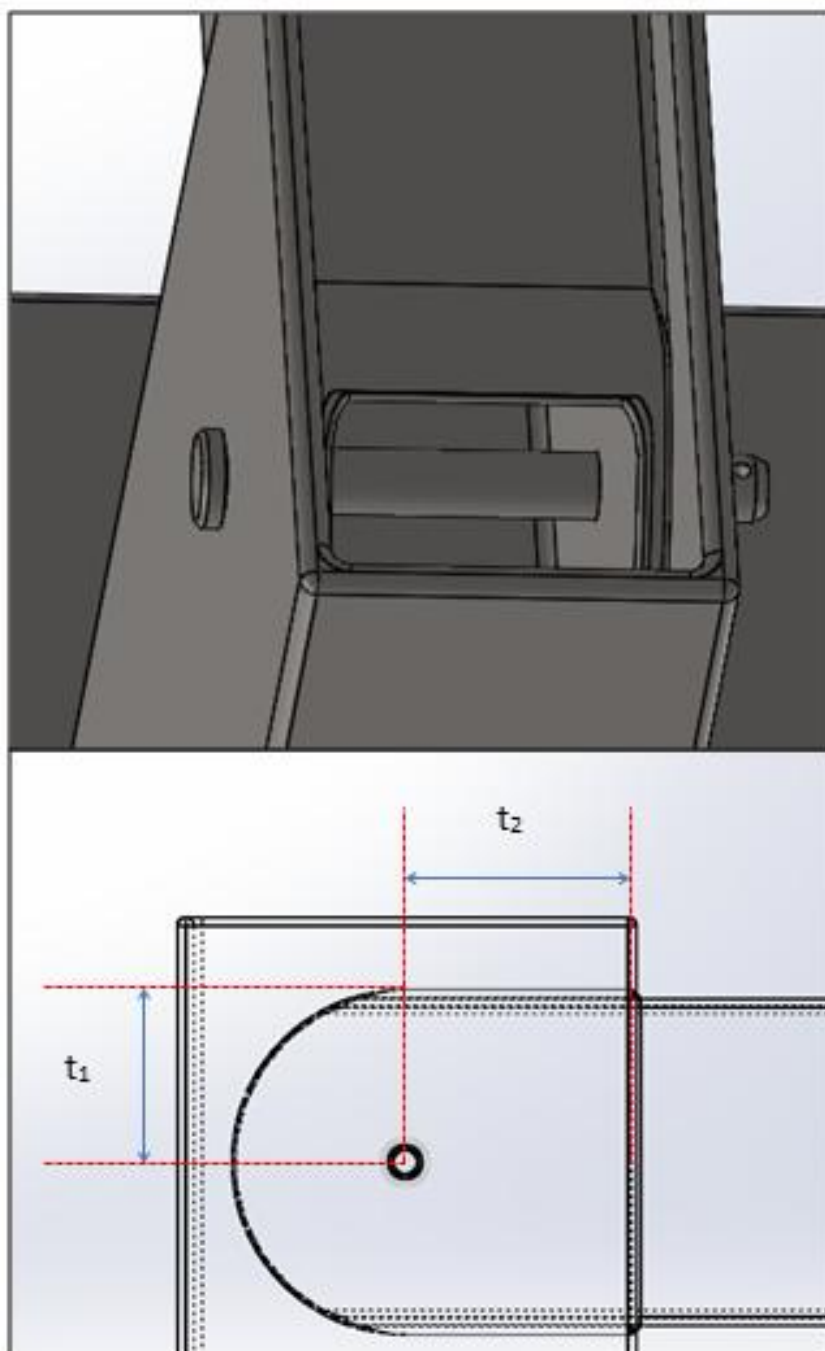


Figura 64: Unió de la barra amb l'articulació per mitjà del rebló

El tipus de passadors que s'utilitzaran per a dur a terme aquestes mecanitzacions seran el que segueixen la normativa ISO 2341:1986<sup>29</sup>. Els tipus de rebló es poden observar en la següent Figura 65. El que s'utilitzarà dels dos és el tipus B amb un forat en l'extrem, per així poder-lo mecanitzar amb un pinça que eviti que el passador pugui sortir-se de la mateixa unió. Les dimensions del mateix vindran representades en la Figura 66, enquadrat amb vermell es tindrà les dimensions del passador de 20 mm de diàmetre mentre que enquadrat amb verd les dimensions del rebló de 30 mm. Pel que fa a la llargada del mateixos, els de  $d=20$  mm tindran un rang de [40 – 200] mm mentre que els de  $d=30$  mm tindran un rang de [60 – 300] mm. Aquestes intervals però, no abastiran totes les distàncies del rang, sinó que ho faran amb passos de 20 mm; per exemple, per als de  $d=20$  mm trobarem passadors de (40, 60, 80, 100...) mm de llargada. Cada passador se li elegirà una longitud específica segons quina sigui la unió a mecanitzar i com d' ampla sigui. Per exemple, per la unió representada en la Figura 64 que té una amplada de 132 mm s'elegirà un rebló de longitud 160 mm deixant una mica de marge per a que es pugui mecanitzar la pinça en el forat de l'extrem. Aquesta pinça és la que es mostra en la Figura 67.

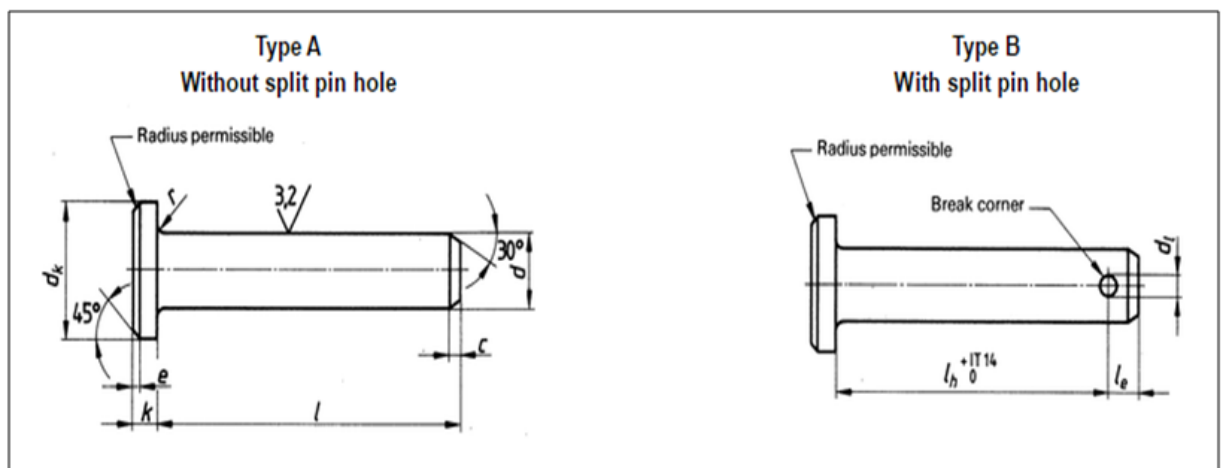


Figura 65: Tipus de passadors de la normativa ISO 2341:1986



Figura 67: Pinça per al passador (DIN 10046)

<sup>29</sup> Normativa ISO 2341:1986. *Normativa per a passadors de forquilla amb cap*. Visualitzar en l'enllaç [https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:2341:ed-2:v1:en] Data de consulta [10/08/2016].<sup>[15]</sup>

$d$	$h_{11}^{(1)}$	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	27	30	33	36	40	45	50	55	60	70	80	90	100
$d_k$	$h_{14}$	5	6	8	10	14	18	20	22	25	28	30	33	36	40	44	47	50	55	60	66	72	78	90	100	110	120
$d_l$	$H_{13}^{(2)}$	0,8	1	1,2	1,6	2	3,2	3,2	4	4	5	5	5	6,3	6,3	8	8	8	8	10	10	10	10	13	13	13	13
$c$	max.	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6
$e$	$\approx$	0,5	0,5	1	1	1	1	1,6	1,6	1,6	1,6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
$k$	$j_{s14}$	1	1	1,6	2	3	4	4	4	4,5	5	5	5,5	6	6	8	8	8	8	9	9	11	12	13	13	13	13
$l_e$	min.	1,6	2,2	2,9	3,2	3,5	4,5	5,5	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10	12	12	14	14	16	16	16	16
$r$		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 66: Dimensions per a cada rebló dependent del diàmetre

## 8.6. Dimensionament cargols de l'articulació fixa.

En aquest apartat es dimensionaran els cargols que uneixen l'articulació fixa amb l'eix giratori de la base motoritzada. Per a fer aquest dimensionament s'ha tingut en compte les forces calculades en el diagrama del sòlid lliure de l'articulació fixa. A més a més es imprescindible tenir en compte que el pes del braç robòtic en la seva totalitat provoca un moment sobre l'articulació fixada en la base motoritzada. A part del pes també és indispensable tenir en compte que al donar-li una certa acceleració al sistema, la força d'inèrcia que es crea en el CG del braç robòtic i que és contrària al moviment també provoca un moment sobre l'articulació fixa. Per a poder calcular aquests moments en la base s'ha partit de tres posicions crítiques per al braç robòtic, en les quals s'ha situat el seu centre de gravetat per així poder calcular els moments creats tant per el pes propi del braç com per la força d'inèrcia degut a l'acceleració. Aquestes posicions crítiques són les següents:

1. **Posició del braç replegat ( $\alpha=\beta=0$ ).** En aquesta posició el braç estarà totalment replegat menys el braç telescòpic que estarà totalment allargat. Com es pot observar en la Figura 48, sobre el CG del braç robòtic actuen dues forces, la del pes que és vertical i la força d'inèrcia contrària a l'acceleració del sistema que és horitzontal. Aquestes dues provoquen un moment total sobre l'articulació fixa que és en sentit antihorari. Primer especificar que s'ha considerat que el sistema accelera en la direcció esmentada ja que així fa augmentar el moment que provoca la força vertical sobre l'articulació. La base i l'altura del CG on s'apliquen les dues

forces s'ha trobat analitzant el model CAD del braç robòtic. Per a fer els càlculs del moment que provoquen aquestes dues forces es necessari especificar algunes dades com:

$$a_{màx} = 0,1g$$

$$m_{braç} = 1.540 \text{ kg} \approx 1600 \text{ kg (per a sobredimensionar càlculs)}$$

$$F_i = ma$$

$$P = mg$$

Per tant, el moment total sobre la base tenint en compte el moment horari trobat en el diagrama del sòlid lliure per l'articulació fixa ( $M'=26.087,37 \text{ Nm}$ ) i els moments creats per aquestes dues forces serà:

$$M_{total} = ma \cdot 1,6 + mg \cdot 2,2 - M' = 10.955,2 \text{ Nm (antihorari)}$$

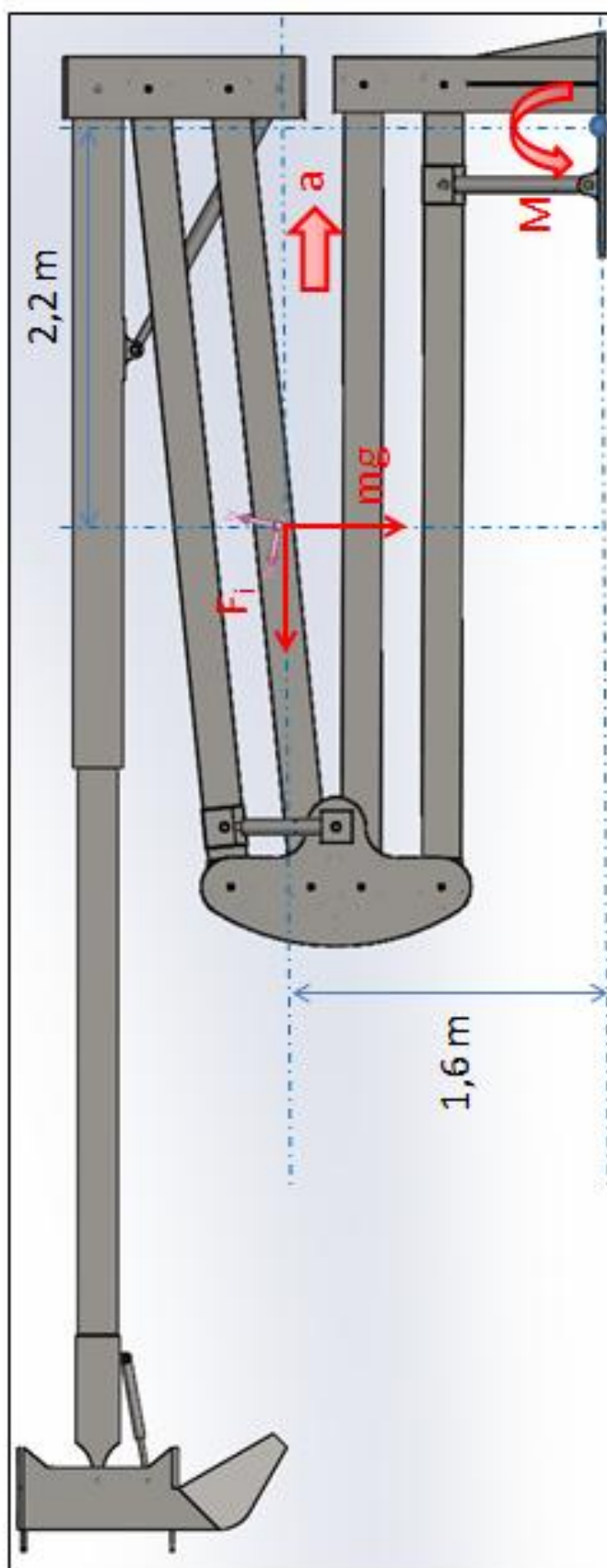


Figura 68: Configuració replegat

2. **Configuració semi desplegat ( $\alpha=55^\circ$  i  $\beta=0^\circ$ ).** El braç telescòpic estarà totalment desplegat. La representació de les forces es pot observar en la Figura 69.

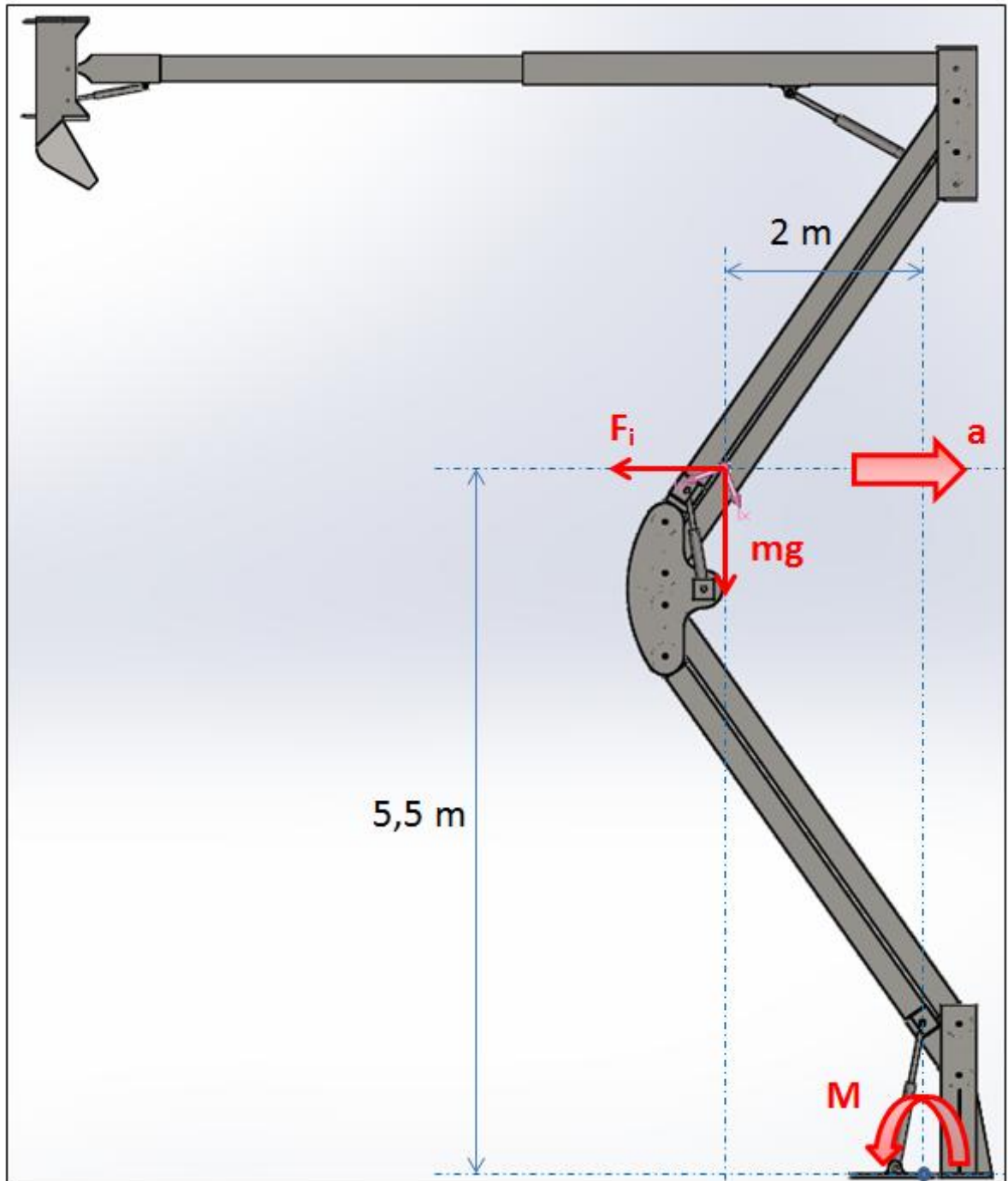


Figura 69: Configuració semi desplegat

En aquesta configuració es prendran les mateixes dades d'acceleració i de pes del braç, l'únic que canviarà respecte al sistema anterior seran les dades de base i altura del CG on s'apliquen les forces del pes i d'inèrcia. Per tant, tenint en compte el moment horari del diagrama del sòlid lliure de l'articulació fixa, el moment total en aquesta articulació serà igual a:

$$M_{total} = ma \cdot 5,5 + mg \cdot 2 - M' = 13.937,4 \text{ Nm (antihorari)}$$

Pel que fa a la configuració del braç totalment desplegat ( $\alpha=55^\circ$  i  $\beta=35^\circ$ ) no es realitzarà els càlculs per comprovar si el moment és més gran que l'anterior. Això es degut a que al inclinar el braç telescòpic  $35^\circ$  respecte la horitzontal, la base del CG disminueix molt mentre que l'altura del CG augmenta considerablement; per tant, com és el terme del pes propi el que aporta la major quantitat de moment en l'articulació base aquest moment total disminuirà respecte l'anterior. Consegüentment es podrà assegurar que el moment calculat en la configuració del braç semi desplegat serà el moment crític per al dimensionament dels cargols,  $M_{CRÍTIC} \approx 14.000 \text{ Nm}$ .

Si es parteix que en la base la resultant horitzontal és pràcticament 0 mentre que la vertical és uns 17.000 N, juntament amb el moment crític calculat i sabent que la distància des d'on està calculat el moment fins al cargol que estarà situat a l'extrem de la peça és de 0,6 m; la força normal total que haurà de suportar aquest cargol serà:

$$F_{cargol_{crític}} = 17000 + 14000 \cdot 0,6 = 25.400 \text{ N} \approx 26 \text{ kN}$$

Gràcies a les especificacions extretes del llibre de Niemann<sup>30</sup> d'una taula per a l'elecció del diàmetre nominal i qualitat del cargol (pàgina 227), s'ha decidit un cargol M16 de qualitat 8.8. Que sigui de mètrica 16 (M16) especifica que el diàmetre nominal serà de 16 mm mentre que sigui de qualitat 8.8 significa que el seu límit elàstic convencional serà de 640 MPa. Els cargols de M16 qualitat 8.8 tenen una

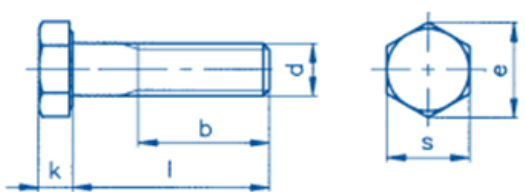
---

<sup>30</sup> G. Niemann, Elementos de Máquinas, Volumen I, Ed. Labor, 1987. <sup>[16]</sup>

força de tensat previ màxima admissible de 78,5 kN i un moment de prémer de 170 Nm (dades adquirides en la taula de la pàgina 227 del llibre Niemann). Per tant, es podrà assegurar que la força màxima a la que es sotmetrà el cargol crític (26 kN) no arribarà mai a la força de tensat màxima admissible. La diferència d'uns 50 kN existent entre la força màxima admissible del cargol i la força en el cargol crític servirà a per a sobredimensionar les dimensions del cargol i així assegurar que aquest mai podrà entrar en fluència.

Un cop s'ha especificat la mètrica i la qualitat, es detallarà que el cargol utilitzat serà el DIN 931 (present en el catàleg d'Hispanox<sup>31</sup>). En la següent Figura 70 es pot observar aquest tipus de cargol i enquadrat en vermell les mesures bàsiques que tindrà. La longitud de la canya del cargol per aquesta mètrica es comercialitza des de l=50 mm fins a l=250 mm.

**TORNILLO CABEZA EXAGONAL ROSCA PARCIAL**  
HEXAGON HEAD BOLTS



k	3,5	4	5,3	6,4	7,5	8,8	10	11,5
e	8,79	11,05	14,38	18,90	21,10	24,49	26,75	30,14
s	8	10	13	17	19	22	24	27
h para L<125	16	18	22	26	30	34	38	42
h para 125<L<200		24	28	32	36	40	44	48
h para L > 200				45	49	53	57	61
d	M-5	M-6	M-8	M-10	M-12	M-14	M-16	M-18

Figura 70: DIN 931 mesures

Per a l'elecció de la longitud de canya serà necessari tenir en compte els requisits que ens mostra la següent Figura 71. Aquest tipus de fixació amb el cargol implica unir dos superfícies evitant la utilització d'una rosca. En la següent imatge es mostra aquest tipus de fixació amb les seves mesures generalitzades i la seva correspondència (requisits). Finalment les mesures totals decidides per a cada un dels 6 cargols presents en l'articulació fixa i que tenen en compte els requisits de la Figura 71 seran:

<sup>31</sup> Empresa Hispanox. *Catàleg de cargols*. Veure especificacions cargol de cap hexagonal DIN 931 d'acer qualitat 8.8 en l'enllaç [[http://www.hispanox.com/downloads/Catalogo\\_general\\_Hispanox.pdf](http://www.hispanox.com/downloads/Catalogo_general_Hispanox.pdf)] Data de consulta [15/08/2016]. <sup>[17]</sup>



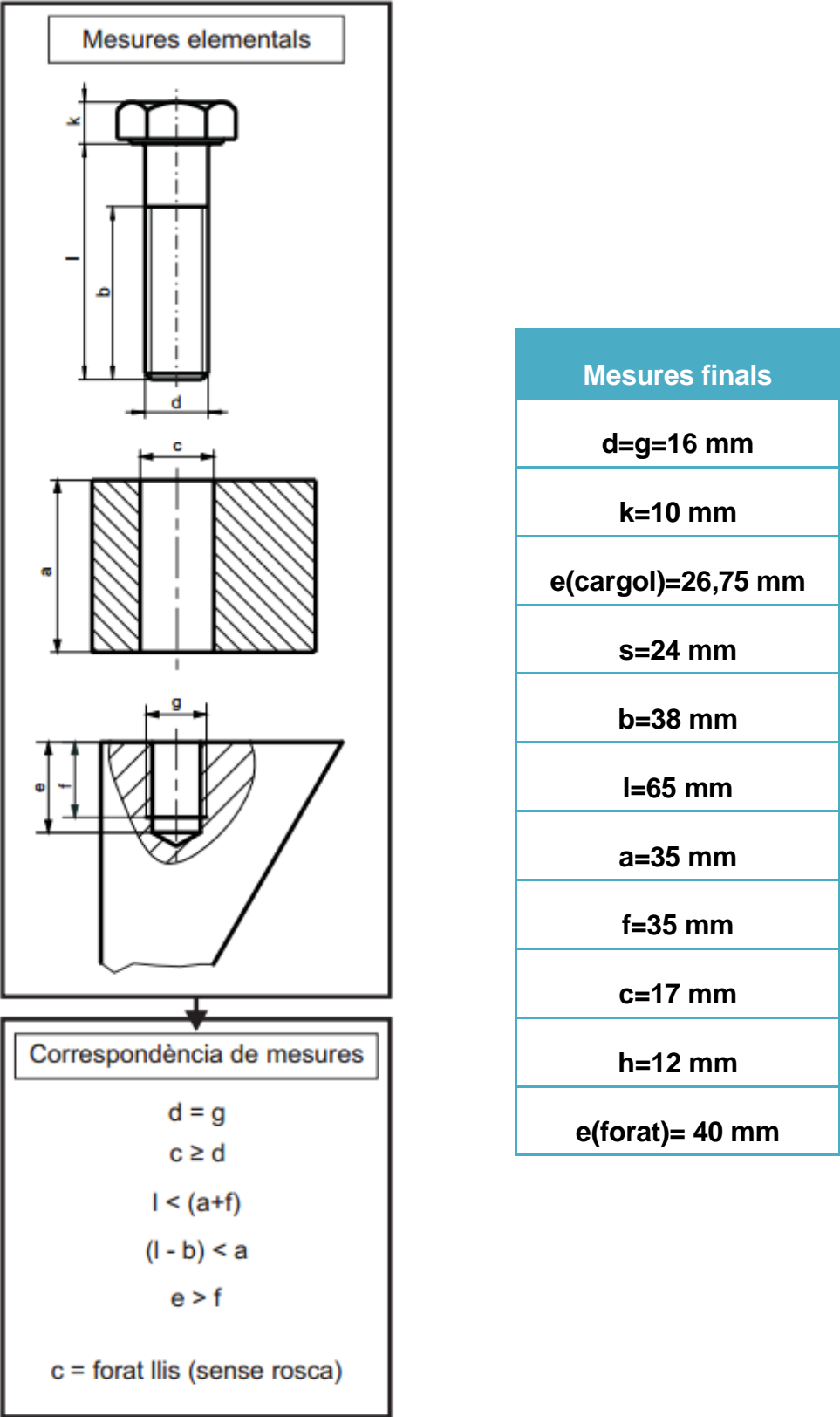


Figura 71: Requisits mesures

## 8.7. Càlcul de la possible bolcada.

Per a realitzar aquest càlcul s'ha partit de la posició més crítica per a la bolcada i s'ha analitzat on cau el CG per aquesta configuració. Aquesta configuració es du a terme quan la màquina està tota replegada amb el braç telescòpic amb el seu màxim allargament. Amb aquesta configuració del braç telescòpic s'aconsegueix que el CG de tot el conjunt estigui lo màxim allunyat possible del centre de rotació en la base motoritzada. En la següent imatge es representarà aquesta configuració i es calcularà a quina distància estarà el CG i l'eix de rotació de la base.

Per tant, com es pot observar en la Figura 72, la distància del CG al eix de gir de la base és de 0,5 m. Com es pot comprovar en les especificació de la màquina Parma16D (veure annex) la base motoritzada té una distància entre estabilitzadors hidràulics d'uns 2,2 m<sup>32</sup> aproximadament; per tant, si la distància del eix de gir de la

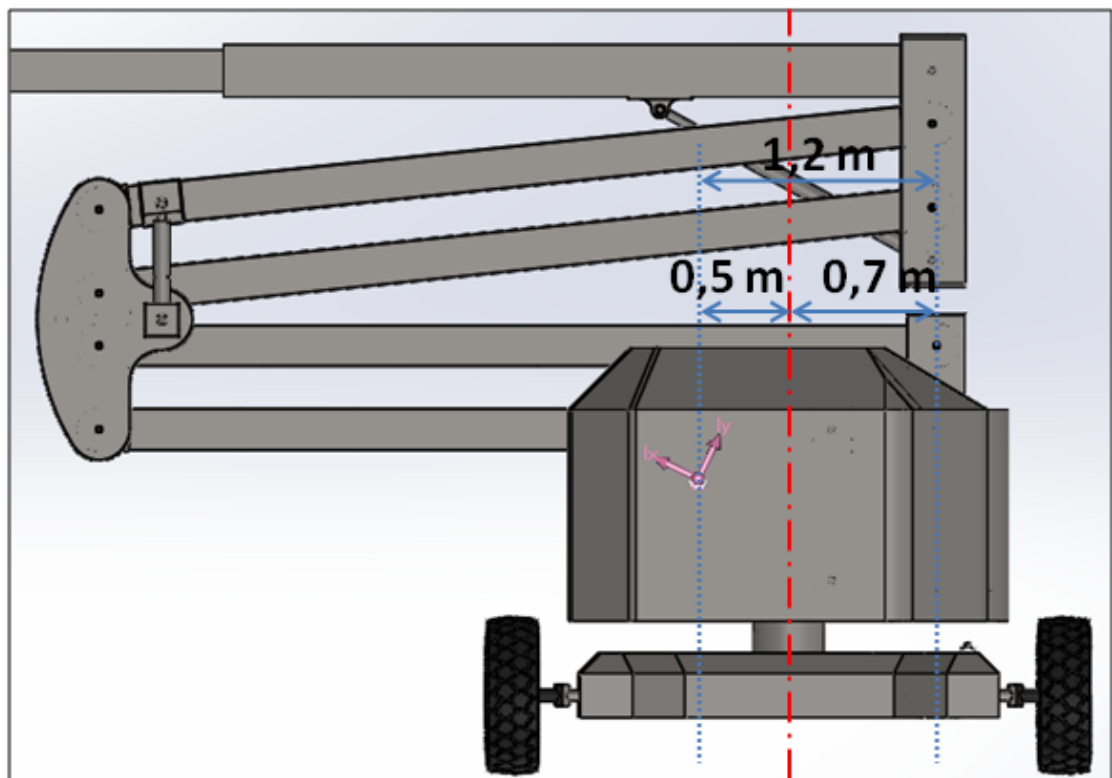


Figura 72: Distàncies del CG al eix de gir

<sup>32</sup> MATILSA. Empresa de plataformes elevadores. *Plataforma elevadora de referència és la Parma 16D*. Veure la fitxa tècnica en l'enllaç [<http://www.matilsa.es/doc/parma16dest.pdf>]. Data de consulta [05/08/2016]. <sup>[8]</sup>

base fins als estabilitzadors és d'uns 1,1 m es pot assegurar que amb la configuració més crítica del braç robòtic el centre de gravetat de l'assemblatge final caurà dins del rectangle confinat pels quatre estabilitzadors en contacte amb el terra. Gràcies a això, es pot confirmar que el assemblatge no fallarà per bolcada.

## 9. Impacte ambiental.

En poques paraules el que s'analitzarà en aquest apartat serà com es reduirà l'impacte mediambiental amb la introducció de la tecnologia dissenyada en els processos de granallat actual en dic sec. Aquesta reducció s'estudiarà dins d'un marc qualitatiu, ja que no es possible detallar quantitativament la reducció total de l'impacte ambiental degut a la desconexió de dades.

### 9.1. Reducció del núvol de pols d'abrasiu.



Figura 73: Granallat en el dic sec.

Aquest impacte és ocasionat en gran part pel núvol de pols d'abrasiu que es genera, ja que és molt tòxic i contaminant tant pel medi ambient com pels operaris que l'executen. Aquest núvol de pols, degut a les altes pressions amb que es propulsa la granalla, s'escampa de manera notable al voltant del tractament i es va expandint a mesura que es va granallant. El fet que aquestes partícules puguin arribar a sobrepassar les immediacions del dic sec i arribar al mar per exemple, provoca que la legislació sigui molt estricta en la utilització d'aquests processos en el dic sec.

Com es pot comprovar en l'anterior imatge el núvol de pols que es crea al voltant del punt d'execució és important.

Un exemple clar es troba en la comparació del dic sec del Port Vell de Barcelona amb les instal·lacions del dic sec en el Port de Cádiz. Mentre que en el Port Vell de Barcelona per al sorreig d'abrasiu és necessari construir una estructura que envolti la zona de tractament per així evitar l'escapament d'abrasiu (manteniment en cobert), en el Port de Cádiz el tractament es realitza a la intempèrie (manteniment en obert), cosa que provoca que les partícules d'abrasiu puguin sobrepassar les instal·lacions del dic. La Figura 73 mostra el tractament de sorreig en obert en el dic sec del Port de Cádiz. La diferent legislació aplicada en aquests dos casos és deguda a que les immediacions del dic sec a Barcelona és una zona urbana i fortament transitada mentre que la situació del dic sec a Cádiz és en un polígon industrial allunyat de zones urbanes. Per tant, en el cas de Barcelona la legislació és molt més estricta perquè si el núvol d'abrasiu tòxic traspassés les immediacions del dic sec podria ser un perill per a les zones urbanes. Això provoca que la legislació mediambiental sigui més estricta a l'hora de decidir com es durà a terme el tractament en el dic sec.

Un cop observades com són d'estrictes les restriccions mediambientals per aquest tipus de processos en el dic sec es va decidir que la màquina disposés d'una tecnologia òptima per a reduir aquest impacte mediambiental. Aquesta tecnologia ja explicada anteriorment consisteix en un recollidor per a la granalla que eviti la formació del núvol de pols i la seva expansió a mesura que es realitza el procés. Per a poder aplegar l'abrasiu projectat sobre la superfície s'ha dissenyat un recollidor que el succionarà mitjançant una bomba de buit. La geometria d'aquest recollidor s'ha triat per a què quan el doll de la granalla projectat a 45° respecte l'horitzontal incideixi sobre la superfície del casc i reboti formant un doll aproximadament amb la mateixa inclinació respecte a l'horitzontal vagi a parar directament a la boca del recollidor on serà succionat. Aquesta tecnologia disminuirà en gran part la formació d'aquest núvol d'abrasiu que tan preocupa a les autoritats mediambientals, per tant, reduirà el impacte ambiental del procés evitant que els partícules puguin escapar-se de les immediacions del dic sec. En la següent imatge es mostra la direcció del doll de sortida i la direcció del doll que rebot a la superfície. Per a poder especificar les mesures d'aquesta imatge s'ha de detallar que l'eina ha estat construïda tenint en compte les següents consideracions<sup>33</sup>: si el diàmetre de la l'embocadura de sortida és de 65 mm i la pressió de sortida del doll és d'uns 10 bars, la seva distància

---

<sup>33</sup> Especificacions extretes de la visita a MB92. *Empresa per al manteniment de iots en el Port Vell de Barcelona*. Veure en l'enllaç [<http://www.mb92.com/>]. Data de consulta [17/07/2016]. <sup>[1]</sup>

d'incidència fins a la superfície tindrà que ser d'uns 400 mm per a que l'impacte de l'abasiu contra la superfície es dugui a terme de manera òptima. En la Figura 74 es pot observar que la distància d'incidència és d'uns 400 mm, mentre que la inclinació del doll de sortida és de  $45^\circ$ . La inclinació de  $45^\circ$  és òptima ja que com s'ha explicat en els apartats anteriors permet el correcte arrencament de les impureses de la superfície. En la imatge es pot apreciar com l'angle del doll que rebota en el casc és de  $40^\circ$  respecte el pla tangencial del punt de tractament, aquesta reducció de l'angle és deguda a que les partícules d'abasiu al tenir grans densitats tendeixen a disminuir aquest angle un cop impacten la superfície.

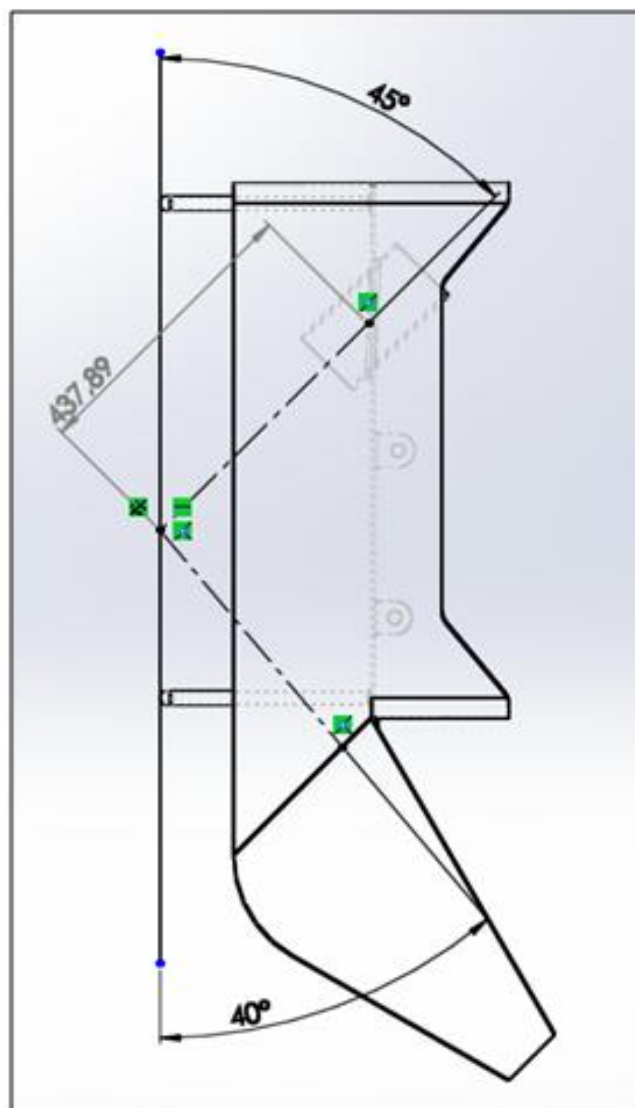


Figura 74: Eina de granallat

Tenint en compte aquestes suposicions, es pot observar com el doll que rebota en el casc anirà a parar directament a la boca del recollidor. A més a més si es té en compte que el recollidor succionarà el material i la majoria del núvol de pols que es va formant al voltant de l'eina, es pot assegurar que aquest núvol disminuirà de forma molt notable. Per tant, l'impacte creat per aquest tipus de tecnologia de granallat en el dic sec serà molt menor al que es produeix amb mà d'obra humana.

## **9.2. Reducció de la petjada de carboni.**

La petjada de carboni d'un procés industrial significa la quantitat d'emissions de diòxid de carboni que s'emeten a l'atmosfera amb la realització del mateix procés. La petjada de carboni que avui en dia es té per a la majoria de processos de manteniment en el dic sec amb mà d'obra humana, ve donada per la utilització de plataformes elevadores o d'altres sistemes d'elevació motoritzats que emeten CO<sub>2</sub> a l'atmosfera en el seu procés de combustió interna. Aquests sistemes d'elevació són utilitzats per els operaris per a poder abastir tots els punts de la superfície del casc del vaixell. En la Figura 73 es pot observar com per al manteniment de punts elevats de la superfície, és necessari l'ús de plataformes elevadores motoritzades.

Pel que fa a la tecnologia descrita en aquest projecte també s'utilitza un sistema d'elevació motoritzat que emet diòxid de carboni a l'atmosfera amb el seu procés de combustió interna. Tot i això, com la tecnologia robotitzada introdueix una reducció del temps totals del manteniment provocarà una disminució de l'ús d'aquests sistemes motoritzats i per tant, una reducció del CO<sub>2</sub> emés a l'atmosfera. Com s'ha comentat anteriorment aquesta reducció es deurà bàsicament a: la disminució dels períodes de parada en el tractament amb la tecnologia automatitzada i a la facilitat del canvi entre el procés de granallat i de pintat amb la simple substitució de l'eina en el braç robòtic.

## 10. Pressupost:

Mà d'obra dedicada per l'autor del projecte al llarg de tot el disseny és:

Mà d'obra	Hores	Preu unitari	Total
<b>Disseny gràfic amb SolidWorks</b>	100 hores	35 €/hora	3.500 €
<b>Estudis estructurals amb ANSYS</b>	50 hores	40 €/hora	2.000 €
<b>Altres càlculs i estudis</b>	75 hores	25 €/hora	1.800 €
<b>Realització de la memòria escrita</b>	75 hores	25 €/hora	1.800 €
<b>Total de la mà d'obra sense IVA 9.100 €</b>			

Figura 75: Pressupost de la mà d'obra

Pel que fa a les eines utilitzades per a du a terme el projecte, els seus costos seran els següents:

- Si es té en compte que s'ha llogat dos mesos la llicència del programa ANSYS pels anàlisis estructurals de tensions i deformacions per un preu aproximat de 2.000 € (1.000 €/mensualitat). Aquesta dada és un preu aproximat que s'ha adquirit per una conversa telefònica amb uns dels proveïdors del software ANSYS a Espanya. Aquests proveïdors són l'empresa ESSS<sup>34</sup>, amb unes oficines situades a Barcelona.
- També s'ha de tenir en compte que s'ha utilitzat el software de SolidWorks 2015. La versió específica que s'ha utilitzat d'aquest programa és la edició estudiantil de SW que la seva llicència costa uns aproximadament 135 €<sup>35</sup>, com es pot comprovar en la pàgina web de SolidWorks.

<sup>34</sup> Empresa ESSS. Proveïdors del software ANSYS a Barcelona. L'enllaç es troba en [http://www.esss.com.es/] Data de consulta [02/09/2016].<sup>[18]</sup>

<sup>35</sup> Dada extreta de l'enllaç [https://store.solidworks.com/studentstore/default.php.].



Per tant el preu total amb l'impost de valor incluit (21%) serà de:

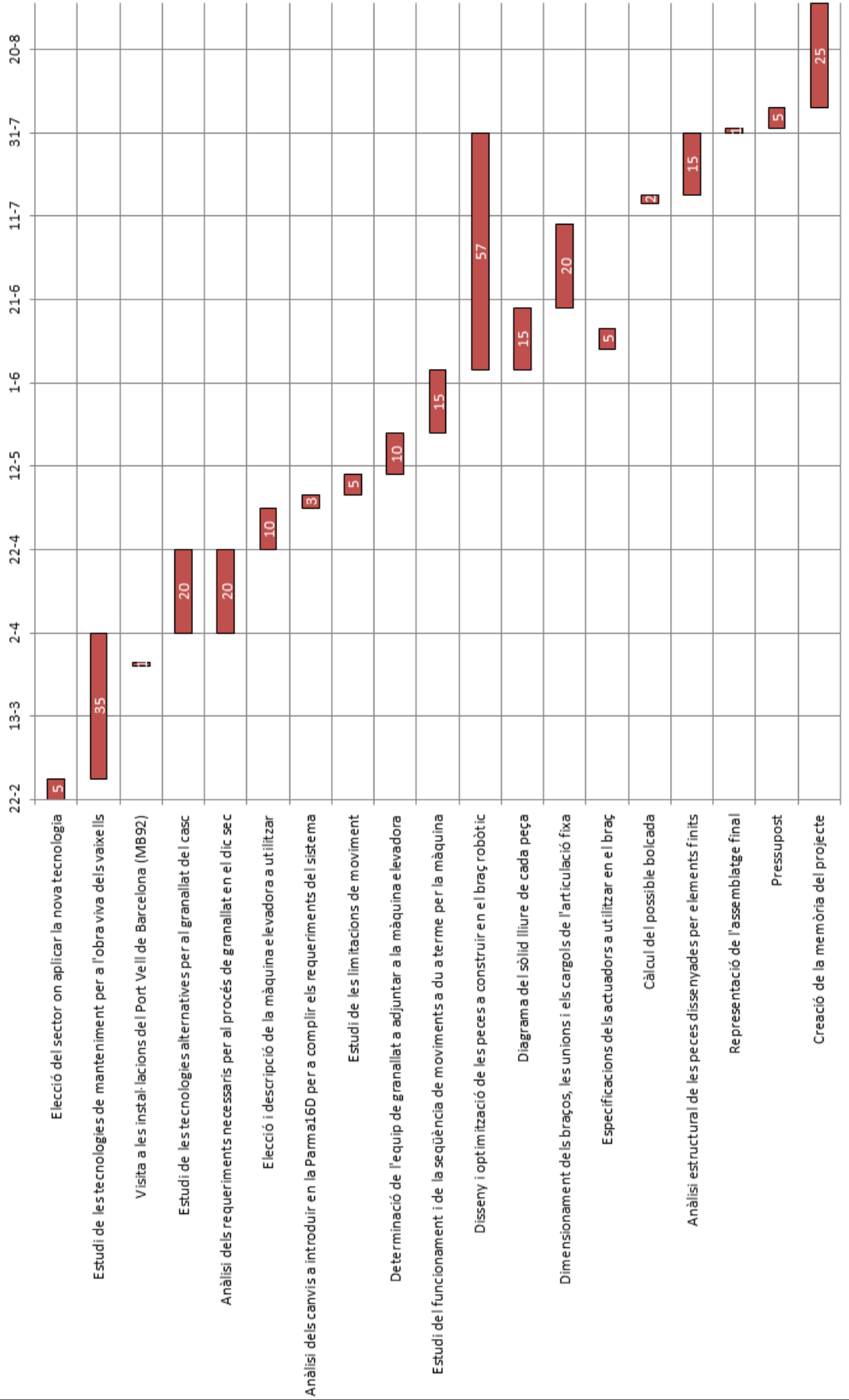
<b>Mà d'obra</b>	<b>9.100 €</b>
<b>Llicències adquirides</b>	<b>2.135 €</b>
<b>Total sense IVA</b>	<b>11.235 €</b>
<b>IVA (21%)</b>	<b>2.359,35 €</b>
<b>Total més IVA</b>	<b>13.594,35 €</b>

## 11. Planificació.

Per a representar la planificació de quins són els passos que s'han realitzat durant tot el projecte, s'ha decidit representar-los en un diagrama de Gantt. En la següent imatge es pot observar el Diagrama de Gantt amb els diferents passos i el seu ordre d'execució, la seva data d'inici i la durada de cadascun.



Diagrama de Gantt



## 12. Conclusions.

Com a primera conclusió del treball i més important, es pot assegurar qualitativament que la introducció d'aquesta tecnologia automatitzada en el sector del manteniment del casc en el dic sec, millorarà l'eficiència del procés respecte a l'actual que es realitza majoritàriament amb mà d'obra humana. Aquesta millora vindrà donada per una disminució del temps total manteniment (menys períodes de parada i facilitat en el canvi d'eina) i per una disminució de la quantitat de recursos a utilitzar, ja que es reutilitzarà en el procés de granallat l'abrasiu sobrant succionat pel recollidor. Aquestes serien els avantatges que suposaria la introducció d'aquesta tecnologia.

Pel que fa als desavantatges o problemàtiques que es trobaran al introduir aquesta màquina en el sector naval, seran els següents:

- La necessitat d'obtenir un model CAD de la superfície del vaixell. Sense aquest model no seria possible la seqüenciació dels moviments del robot elevador al voltant de la superfície. Aquest model es buscarà d'obtenir-lo al fabricant del casc del vaixell.
- La necessitat de dissenyar un equip de granallat i de pintat (descrits en l'estat de l'art) mòbils; perquè a mesura que es vagi movent el robot elevador al voltant de la superfície, els mateixos equips vagin acompanyant solidàriament a la màquina que executa el tractament. La distància entre l'equip de tractament i el robot ha de ser la mínima possible, evitant així les pèrdues per fricció en les mànegues.
- A causa de la geometria del robot i les seves limitacions de moviment, aquest no serà capaç de tractar totes les superfícies del casc. Com per exemple les zones de sota del casc no serà capaç de tractar-les, per tant, s'hauran de tractar amb algun altre mètode.
- La inversió inicial que suposaria implantar la tecnologia per culpa de la seva complexitat. Aquesta complexitat ve donada, per ficar un exemple, per la presència de sistemes electrònics i algorismes integrats en l'automatisme, que requeririen l'ajuda d'un equip d'informàtics i electrònics.

Tot i això, aquesta gran inversió inicial es veuria compensada a llarg termini, ja que una millora de l'eficiència dels processos de manteniment, provocaria un augment del rendiment del dic sec (degut a la disminució del temps del tractat) i una disminució dels materials utilitzats en el tractament (degut al reciclatge d'aquestos).



## 13. Agraïments.

En aquest apartat apareixen els noms de totes aquelles que m'han ajudat a fer possible la realització d'aquest projecte:

- Emilio Angulo, que m'ha recolzat en la realització de les diverses etapes que comprenen el projecte.
- Jaume Passola, encarregat del dic sec del Port Vell de Barcelona de l'empresa MB92, que m'ha facilitat gran quantitat d'informació referent als processos actuals de manteniment per al casc dels vaixells i que m'ha aconsellat sobre la tecnologia a dissenyar per a realitzar aquests tractaments.
- Josep Garcia, que m'ha aconsellat sobre l'optimització del disseny estructural del braç robòtic.
- Miquel Carnicé, que m'ha ajudat a enfocar el treball i en el disseny dels models CAD.
- M. Magdalena Pastor i Francesc Roure del departament de Resistència de Materials per les ajudes donades en diferents estudis.
- Ignasi Garcia del departament d'Expressió Gràfica per les ajudes donades en els dissenys gràfics del projecte.





## 14. Bibliografia.

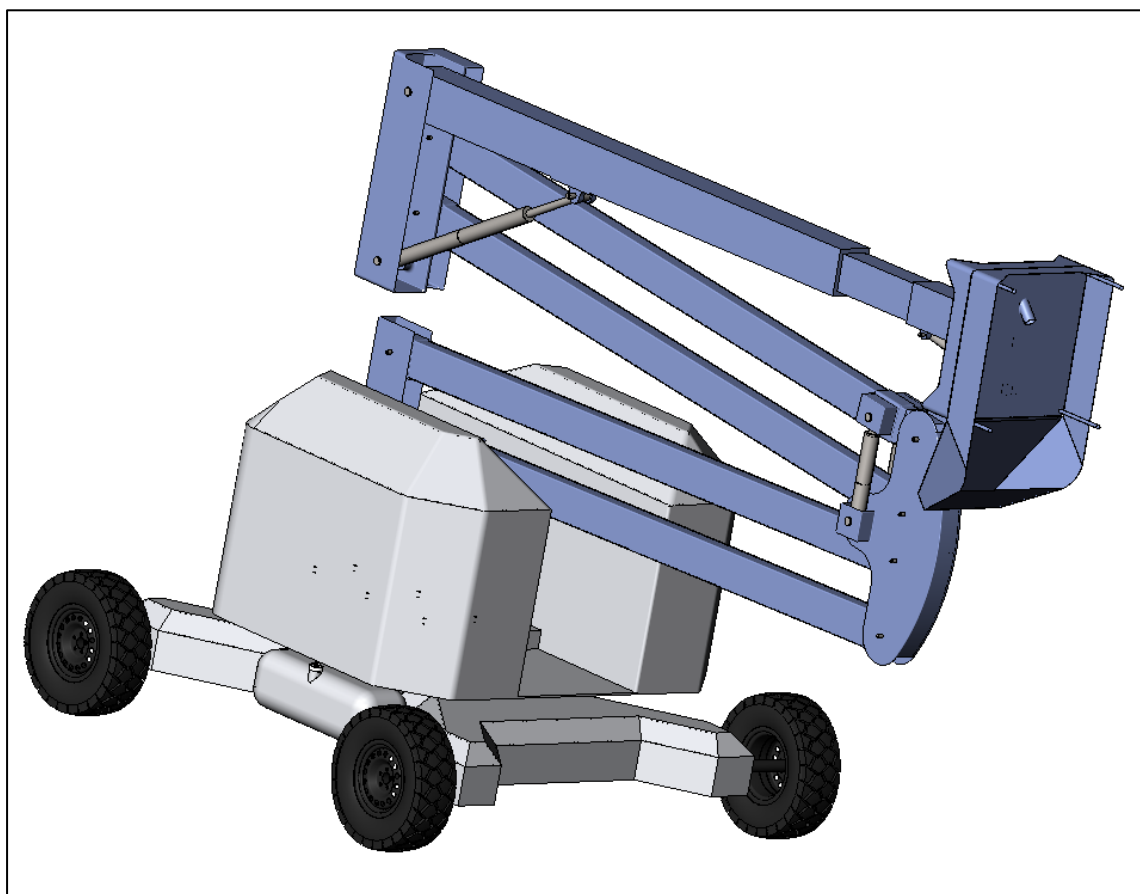
- [1] MB92. *Empresa per al manteniment de iots en el Port Vell de Barcelona*. Veure en l'enllaç [<http://www.mb92.com/>]. Data de consulta [17/07/2016].
- [2] Couto Maquinaria S.L. Empresa d'equips de sorreig i pintat. *Equip de sorreig portàtil RACOHl model RCH-200*. Especificacions presents en l'enllaç [<http://www.coutomaquinaria.com/doclib/documento/es/Ficha%20CHORREADORA%20RCH%20200%20espaol.pdf>] Data de consulta [28/08/2016].
- [3] Couto Maquinaria S.L. *Sistema de reciclatge d'abrasiu RACOHl model RC-50-20*. Especificacions presents en l'enllaç [<http://www.coutomaquinaria.com/doclib/documento/es/Ficha%20SISTEMA%20RECICLAJE%20DE%20ABRASIVO%20POR%20AIRWASH%20espaol.pdf>] Data de consulta [28/08/2016].
- [4] Couto Maquinaria S.L. *Mànega de doll d'abrasiu RACOHl model PREMIUM*. Especificacions disponibles en l'enllaç [<http://www.coutomaquinaria.com/doclib/documento/es/Ficha%20MANGUERA%20CHORRO%20espaol.pdf>] Data de consulta [28/08/2016].
- [5] Griñó Rotamik S.A. Empresa distribuïdora de tecnologies de buit i pressió. *Grup de buit model DH-TH*. Enllaç present en [<http://www.grino-rotamik.es/productos/grupos-de-vacio/dh--th-22>] Data de consulta [28/08/2016].
- [6] AIRMAC. Empresa de compressors i secadors d'aire comprimit. *Compressor de pistó AIR 912/500 TF/15*. Especificacions en l'enllaç [<http://www.airmaccompresores.com/es/products/%20compresores-aire-comprimido-compresores-de-piston-doble-etapa-airmac-compresores-piston/compresores-aire-comprimido-de-piston-con-transmision-por-correas-AIRMAC-AIR-912-500-TF-15>] Data de consulta [28/08/2016].
- [7] Empresa BRI OFFSHORE. *Robot de manteniment model M3 Hydroblasting*. Present en l'enllaç [<http://www.brioffshore.no/product/m3-hydroblasting>] Data de consulta [05/07/2016].
- [8] MATILSA. Empresa de plataformes elevadores. *Plataforma elevadora de referència és la Parma 16D*. Veure la fitxa tècnica en l'enllaç [<http://www.matilsa.es/doc/parma16dest.pdf>]. Data de consulta [05/08/2016].
- [9] AZO Materials. *Material AISI 1020*. Propietats definides en l'enllaç [<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9145>] Data de consulta [26/07/2016].

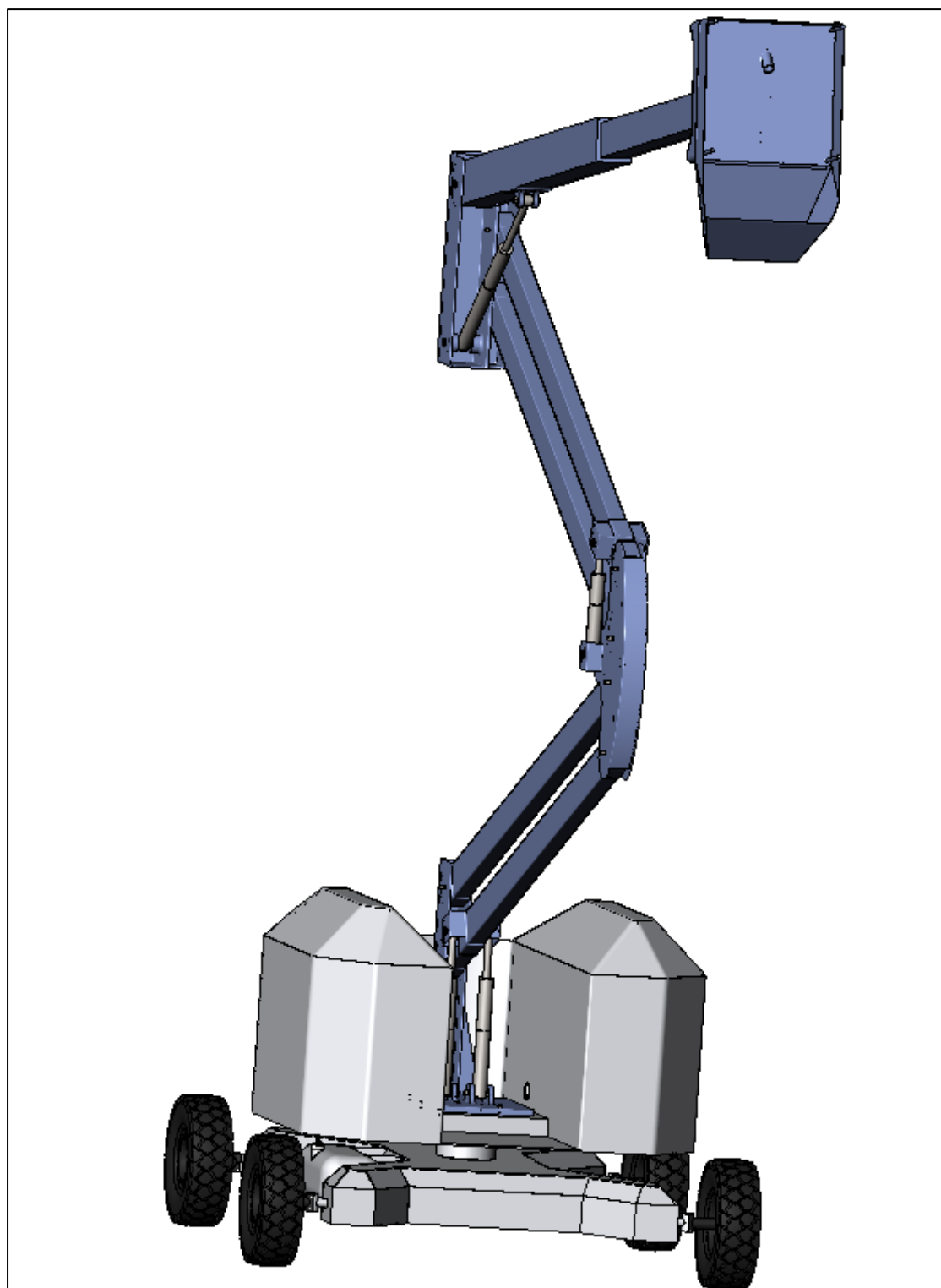
- [10] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. *Departament de Resistència de Materials (ETSEIB)*. Formulari de l'assignatura Resistència de Materials.
- [11] Normativa CIRSOC. *Taules de perfils laminats i tubs estructurals*. Veure especificacions dels tubs de secció rectangular en l'enllaç  
[<http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/tablas.pdf>] Data de consulta [02/08/2016].
- [12] Empresa CONDESA. *Catàleg de tubs estructurals*. Veure especificacions del tub rectangular acabat en fred en l'enllaç  
[[http://www.condesa.com/pdf/es/TUBO\\_ESTRUCTURAL\\_CASTV3.pdf](http://www.condesa.com/pdf/es/TUBO_ESTRUCTURAL_CASTV3.pdf)] Data de consulta [05/08/2016].
- [13] Empresa Suministros Tecnicos del Sur (STS) S.A. *Catàleg de cilindres hidràulics*. Veure especificacions dels actuadors de doble efecte en l'enllaç  
[<http://www.sts.es/archivos/PRODUCTOS/CATALOGO/CILINDROS%20HIDRAULICOS.pdf>] Data de consulta [06/08/2016].
- [14] Empresa Interlloy. *Material AISI C1045*. Propietats del material definides en l'enllaç  
[<http://www.interlloy.com.au/our-products/carbon-steels/1045-medium-tensile-carbon-steel-bar/>] Data de consulta [08/08/2016].
- [15] Normativa ISO 2341:1986. *Normativa per a passadors de forquilla amb cap*. Visualitzar en l'enllaç [<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:2341:ed-2:v1:en>] Data de consulta [10/08/2016].
- [16] G. Niemann, Elementos de Máquinas, Volumen I, Ed. Labor, 1987.
- [17] Empresa Hispanox. *Catàleg de cargols*. Veure especificacions cargol de cap hexagonal DIN 931 d'acer qualitat 8.8 en l'enllaç  
[[http://www.hispanox.com/downloads/Catalogo\\_general\\_Hispanox.pdf](http://www.hispanox.com/downloads/Catalogo_general_Hispanox.pdf)] Data de consulta [15/08/2016].
- [18] Empresa ESSS. Proveïdors del software ANSYS a Barcelona. L'enllaç es troba en [<http://www.esss.com.es/>] Data de consulta [02/09/2016].

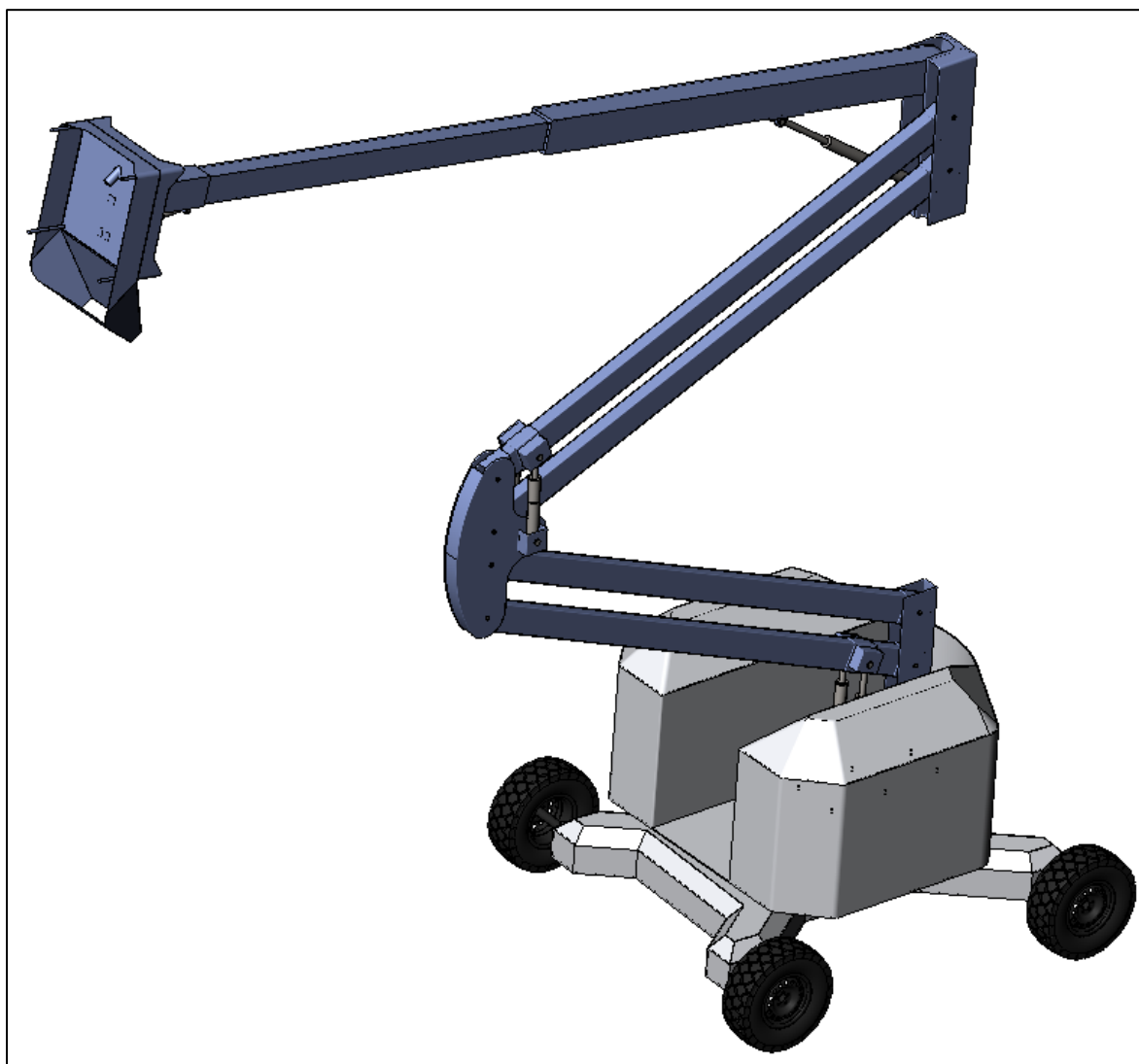
## 15. Annexos.

### 15.1. Imatges de l'assemblatge final.

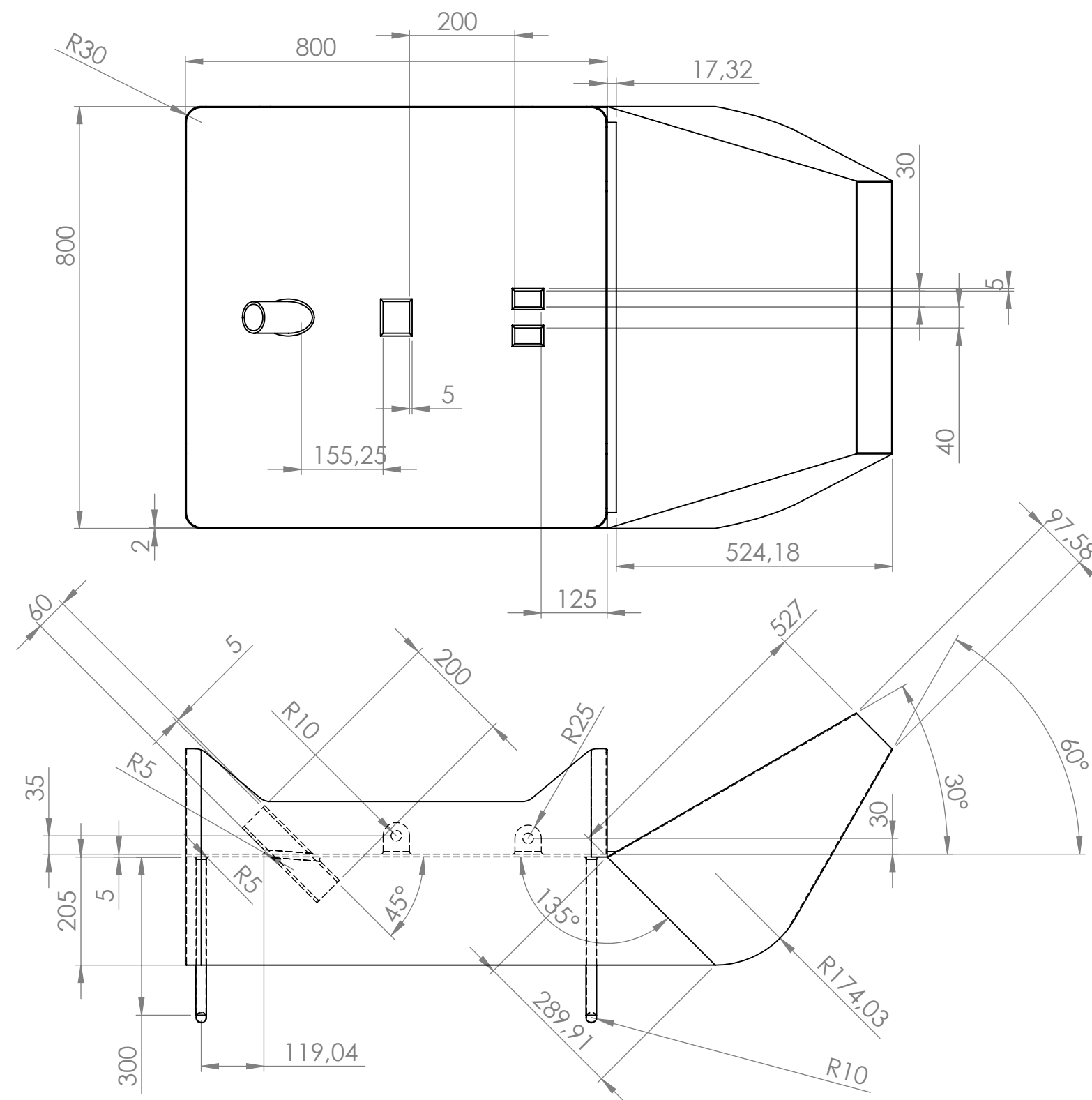
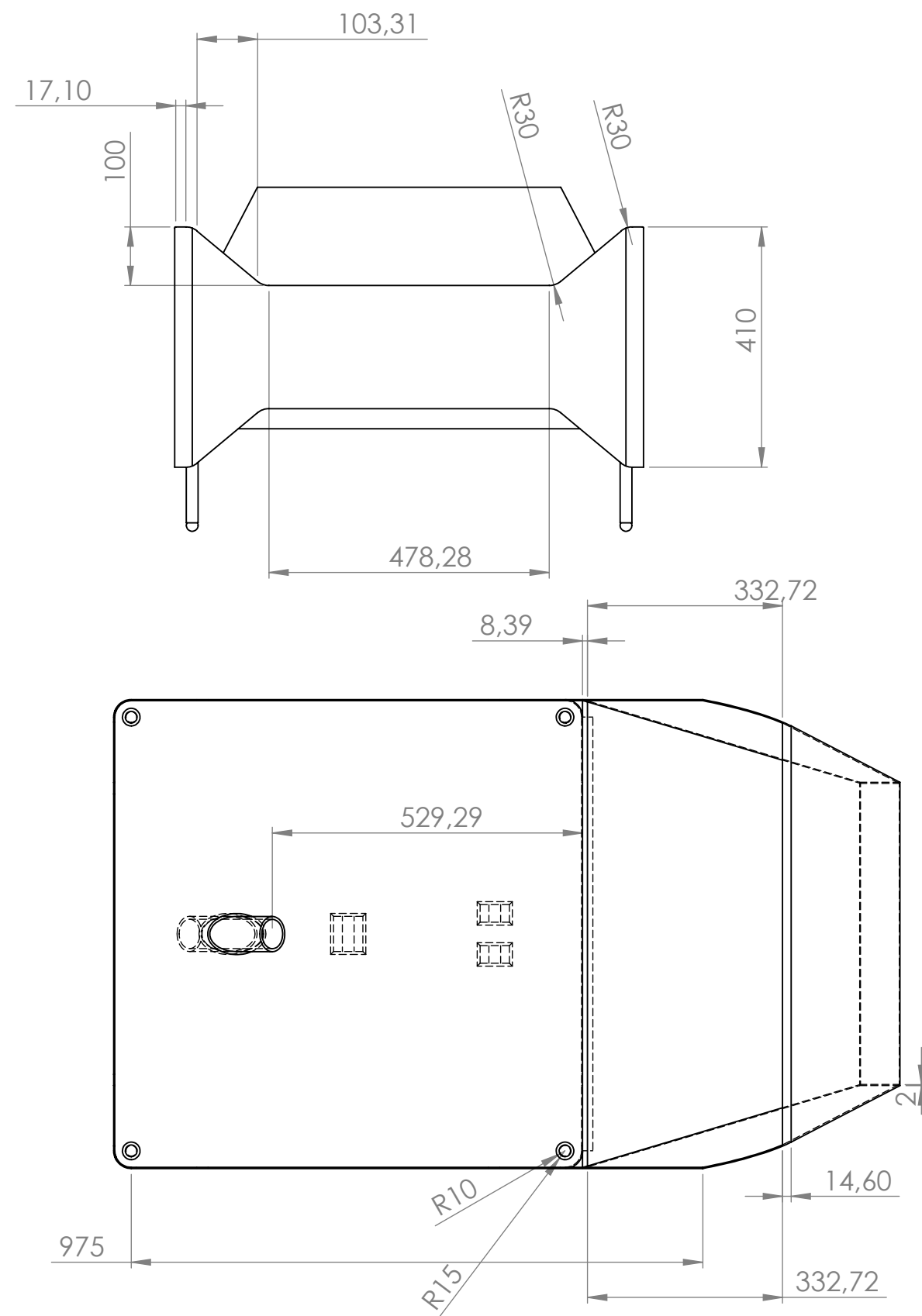
En aquest apartat es veurà l'acabat final que tindrà l'assemblatge dissenyat.







## **15.2. Plànols.**



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria  
Industrial de Barcelona



Data: 25/08/2016

Autor: Lluís Manresa Castelló

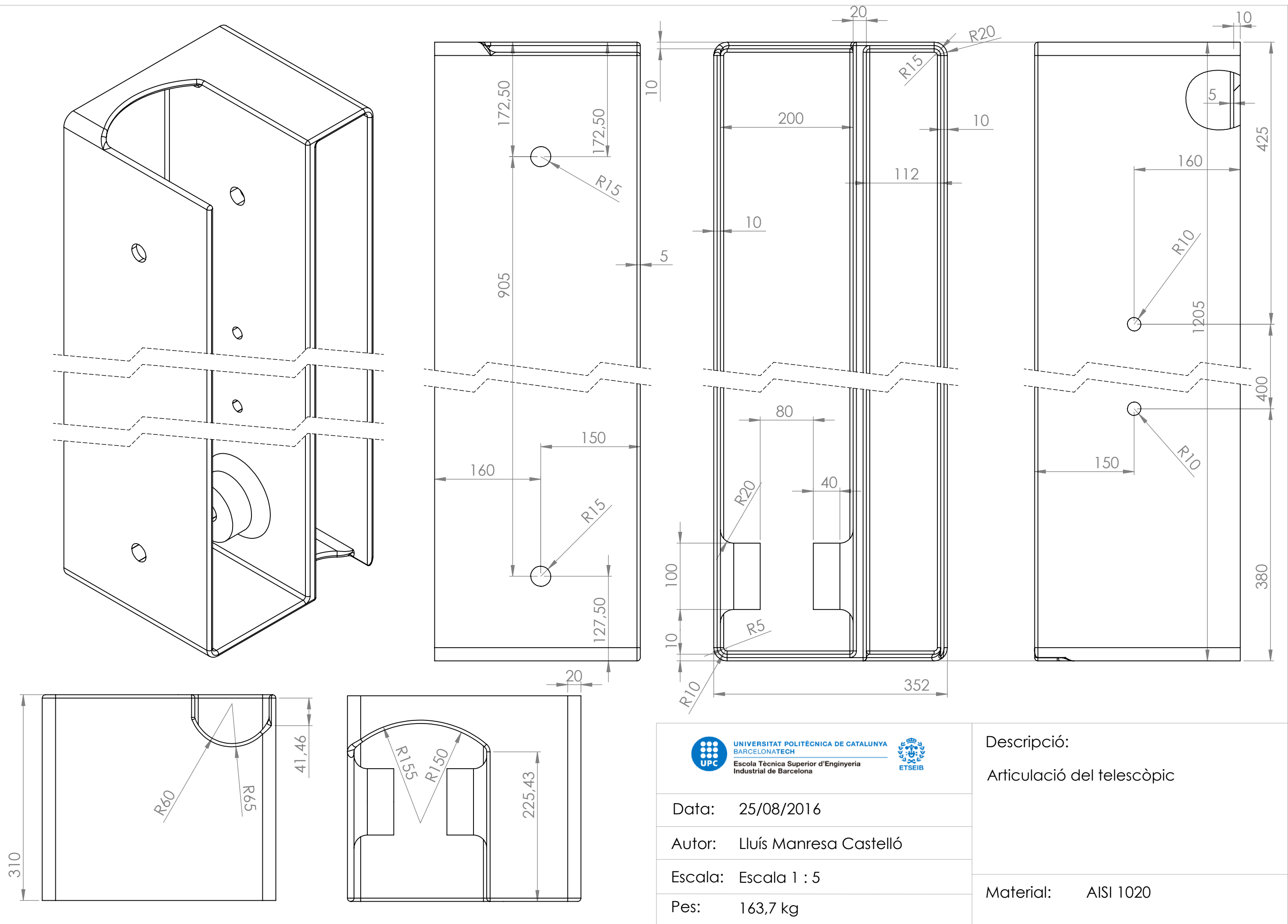
Escala: 1 : 10

Pes: 56 kg

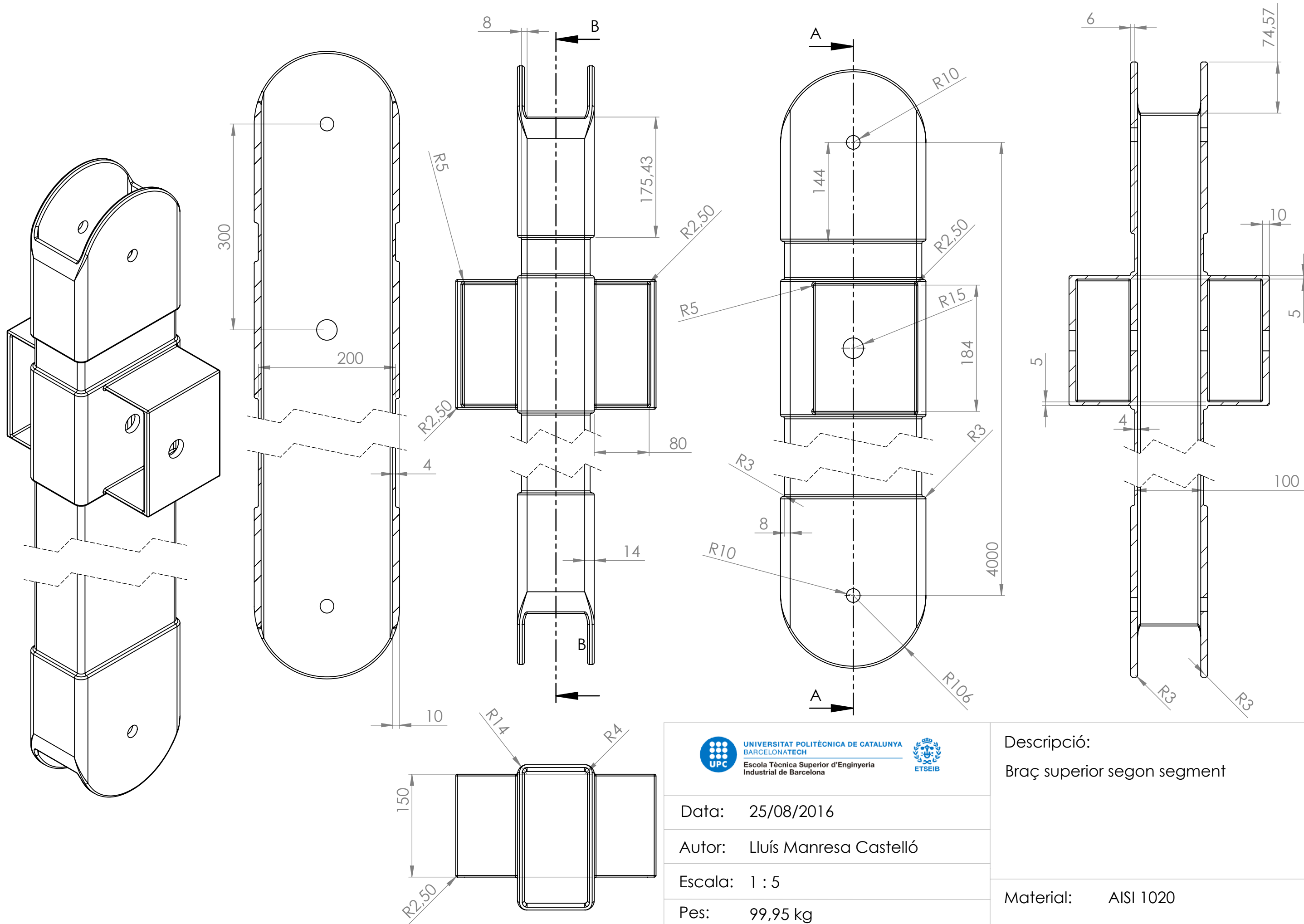
Descripció:  
Eina de granallat

Material: AISI 1020





<div><div><div>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH</div></div><div><div>Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona</div></div></div>		<div>Descripció:</div> <div>Articulació del telescòpic</div>
Data: 25/08/2016		
Autor: Lluís Manresa Castelló		
Escala: Escala 1 : 5		
Pes: 163,7 kg		Material: AISI 1020



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria  
Industrial de Barcelona



Data: 25/08/2016

Autor: Lluís Manresa Castelló

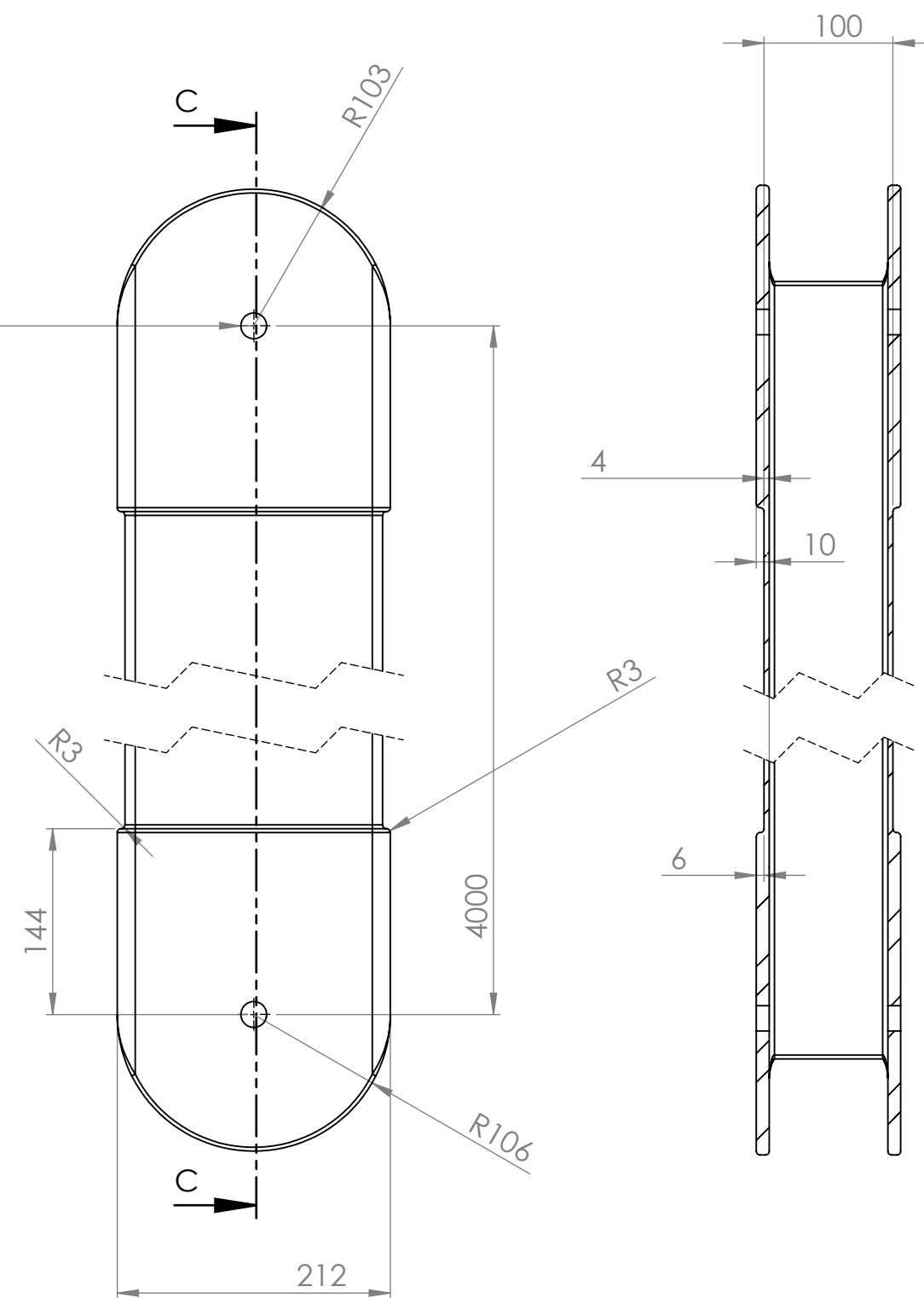
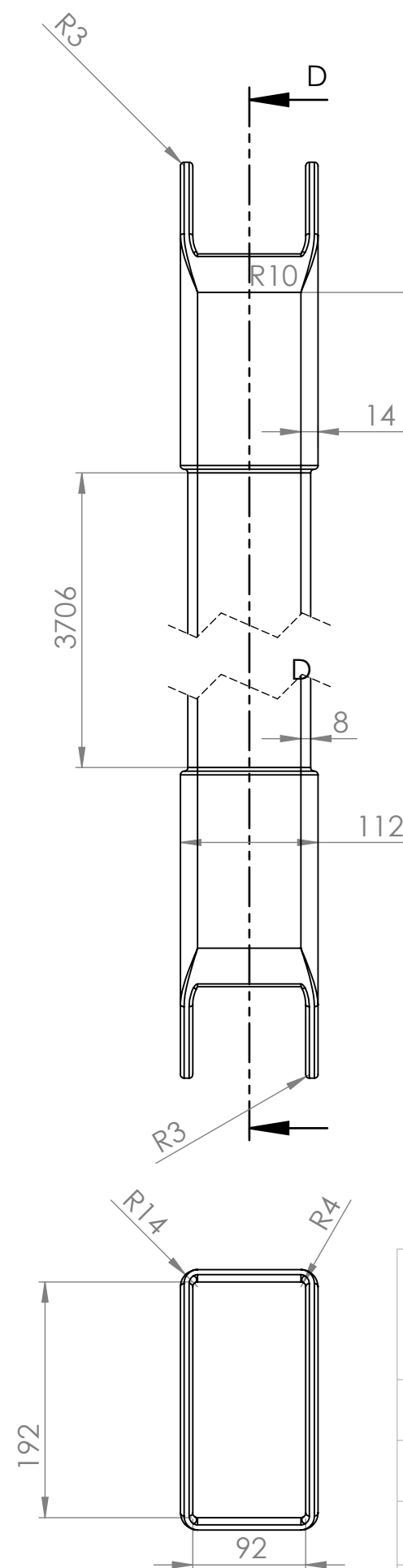
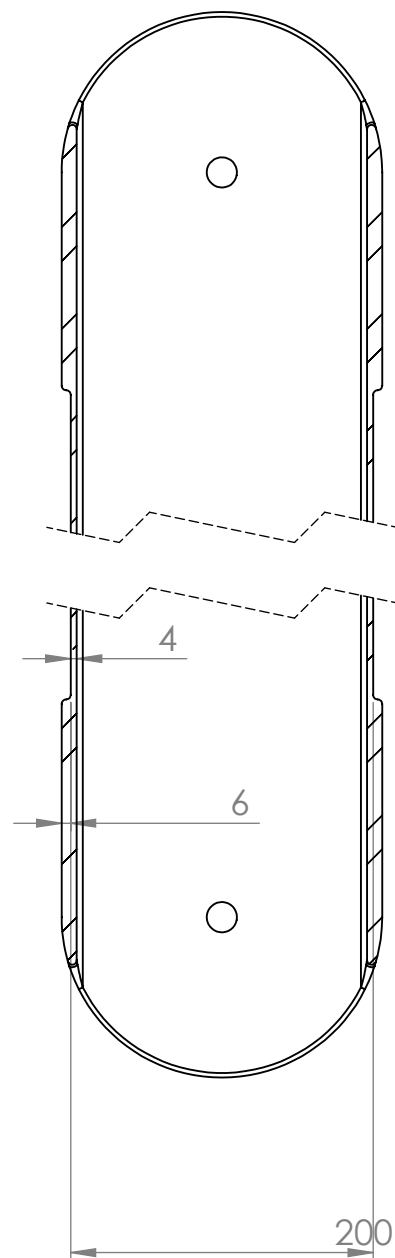
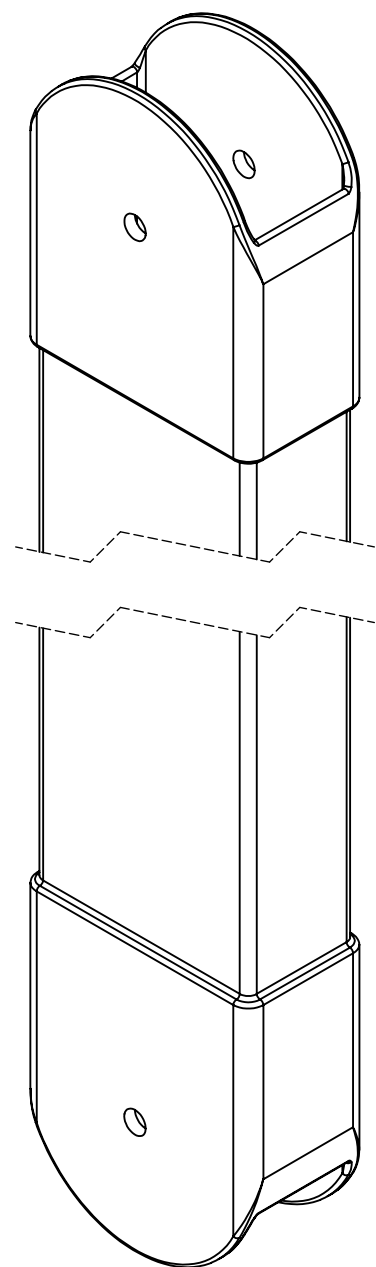
Escala: 1 : 5

Pes: 99,95 kg

Descripció:

Braç superior segon segment

Material: AISI 1020



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria  
Industrial de Barcelona



Data: 25/08/2016

Autor: Lluís Manresa Castelló

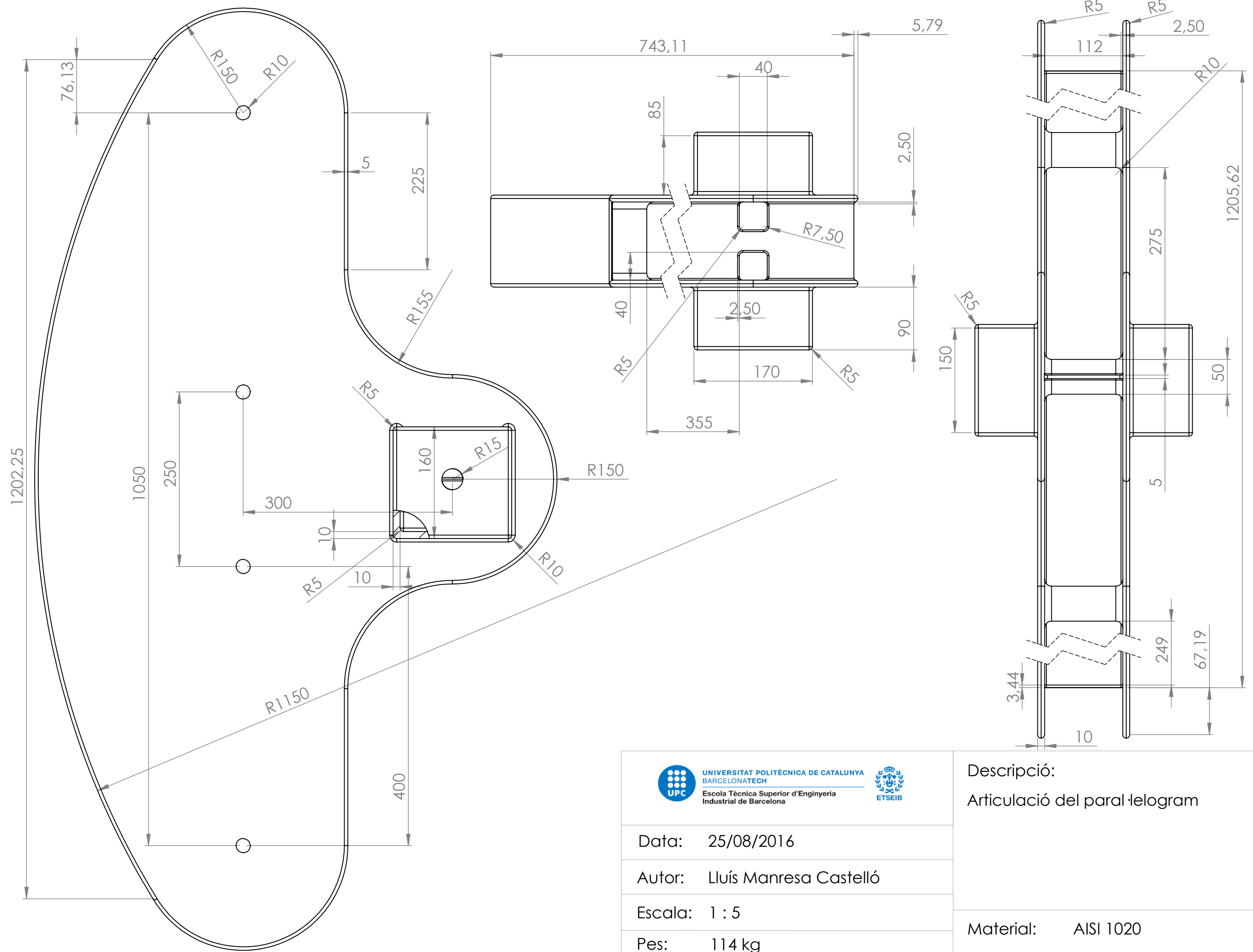
Escala: 1 : 5

Pes: 86,93 kg

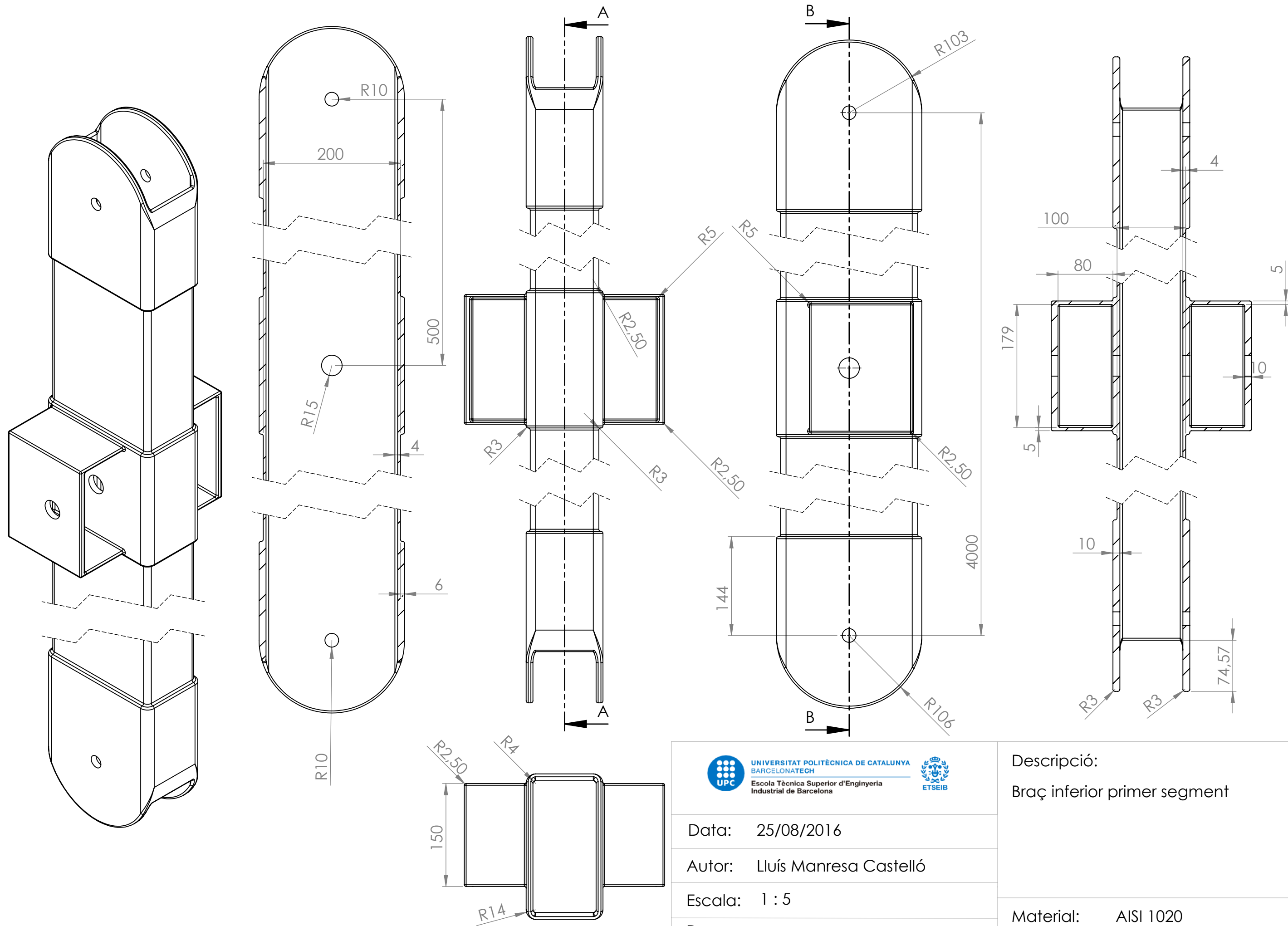
Descripció:



Braç de força axial

Material: AISI 1020



<div><div></div><div><div>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH</div><div>Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona</div></div><div></div></div>		Descripció:  Articulació del paral·lelogram
Data: 25/08/2016		
Autor: Lluís Manresa Castelló		
Escala: 1 : 5		
Pes: 114 kg		Material: AISI 1020



<div><div><div>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH</div></div><div><div>Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona</div></div></div>		Descripció:  Braç inferior primer segment	
Data: 25/08/2016		Material: AISI 1020	
Autor: Lluís Manresa Castelló			
Escala: 1 : 5			
Pes: 99,95 kg			

